

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta strojní

Ústav strojírenské technologie



Disertační práce

Optimalizace návrhu výrobních linek v automobilovém průmyslu

Autor:	Ing. Petr HYNEK
Doktorský studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Strojírenská technologie
Školitel:	doc. Ing. Viktor KREIBICH, CSc.

Praha 2019



Anotace:

Vysoká škola:	ČVUT v Praze, Fakulta strojní
Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Vedoucí ústavu:	doc. Ing. Ladislav KOLAŘÍK, Ph.D., IWE
Téma disertační práce:	Optimalizace návrhu výrobních linek v automobilovém průmyslu
Akademický rok:	2018/2019
Autor:	Ing. Petr HYNEK
Vedoucí práce:	doc. Ing. Viktor KREIBICH, CSc.
Klíčová slova:	Projektování, výrobní systém, výrobní proces, simulace, svařovna, automobilový průmysl, optimalizace, genetické algoritmy

Rozsah práce a příloh:

Počet stran:	110
Počet obrázků:	55
Počet tabulek:	22
Počet rovnic:	21



Annotation:

University:	CTU in Prague, Faculty of Mechanical Engineering
Department:	Department of Manufacturing Technology
Head of the department:	doc. Ing. Ladislav KOLAŘÍK, Ph.D., IWE
Theme of work:	Optimization of design process of production lines in automotive industry
Academic year:	2018/2019
Autor:	Ing. Petr HYNEK
Supervisor:	doc. Ing. Viktor KREIBICH, CSc.
Keywords:	Design process, production system, production process, simulation, body shop, automotive industry, optimalization, genetic algorithms

Volume of work:

Number of pages:	110
Number of pictures:	55
Number of tables:	22
Number of equations	21



Abstrakt:

Tato disertační práce se zabývá projektováním výrobního systému výrobních linek v automobilovém průmyslu, konkrétně svařovny. Nejprve je provedena rešerše výrobních systémů s návazností na jejich projektování. Dále se rešerše věnuje simulačním metodám při návrhu výrobních linek a používaným algoritmům k vyřešení úloh projektování výrobních systémů nebo řízení výroby. Dále jsou jednotlivé fáze projektování detailně popsány. Při popisu simulace dostupnosti svařovacích odporových kleští je definován problém, a to výběr optimální kombinace svařovacích odporových kleští, které při simulaci nebyly v kolizi se svařencem. Pro nalezený problém je v disertační práci navržen postup řešení, který využívá simulaci výrobního zařízení v kombinaci s globálními algoritmy. Navržený postup je použit při hledání optimálních kombinací svařovacích odporových kleští pro 2 varianty. Pro řešení optimální kombinace je použit softwarový doplněk Solver, který je součástí tabulkového procesoru MS Excel.

Abstract:

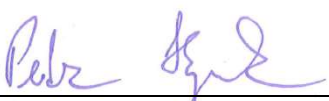
This doctoral thesis analyses the design of the production system of production lines in the automotive industry, especially in body shop. First, a search of manufacturing systems is carried out with a link to their design. Furthermore, the research focuses on the simulation methods for the design of production lines and the algorithms used to solve the problems of designing production systems or production control. Furthermore, the individual phases of designing are described in detail. In describing the simulation of the availability of welding resistive guns, a problem is defined, namely the selection of the optimum combination of welding resistive guns that did not collide with the weldment during simulation. For the found problem is proposed in the dissertation procedure a solution that uses simulation of production equipment in combination with global algorithms. The proposed procedure is used to find optimal combinations of welding resistance guns for 2 variants. The Solver software add-on, which is part of the MS Excel spreadsheet, is used to solve the optimal combination.



Prohlášení

Prohlašuji, že jsem disertační práci na téma „Optimalizace návrhu výrobních linek v automobilovém průmyslu“ vypracoval samostatně pod vedením doc. Ing. Viktora KREIBICHA, CSc. a uvedl v seznamu literatury všechny použité literární a odborné zdroje.

V Praze dne 18. 1. 2019


vlastnoruční podpis autora



Poděkování

Rád bych na tomto místě poděkoval svému školiteli doc. Ing. Viktorovi Kreibichovi, CSc. za vedení mé disertační práce a cenné připomínky.

Poděkovat chci také své rodině, která mě podporovala po celou dobu mého studia.



Obsah

Seznam použitých zkratk	9
1. Úvod	11
2. Současný stav řešené problematiky	12
2.1. Výrobní systémy	12
2.1.1. Lean Production (štíhlá výroba)	13
2.1.2. TPS (Toyota Production System)	14
2.2. Projektování výrobních systémů	16
2.2.1. Projektování výrobních systémů v automobilovém průmyslu ...	17
2.3. Simulace výrobních procesů	19
2.4. Řešící algoritmy vhodné k optimalizaci	22
2.4.1. Matematické programování	22
2.4.2. Globální evoluční algoritmy	23
2.4.3. Pravděpodobnostní metody	26
2.4.4. Metody kolektivní inteligence	27
2.5. Shrnutí a dílčí závěr	27
3. Cíle disertační práce	29
4. Projektování svařovacího výrobního zařízení	31
4.1. Struktura procesu výroby karosérie	31
4.2. Používané spojovací technologie	34
4.2.1. Odporové bodové svařování	37
4.2.2. Obloukové svař. tavící se el. v ochranném plynu – MIG/MAG ..	42
4.2.3. Přivařování svorníků	44
4.2.4. Laserové svařování	45
4.2.5. Lepení	46
4.2.6. Lemování	48
4.3. Proces plánování svařovacích linek	49
4.4. Definice ukazatelů	52
4.4.1. Spojovací ekvivalent	52
4.4.2. Hloubka výroby	54
4.4.3. Stupeň automatizace	55
4.5. Projektování pomocí nástrojů digitální továrny	59



4.5.1.	Produkt.....	59
4.5.2.	Provozní prostředky	60
4.5.3.	Operační struktura	62
4.5.4.	Projektování svař. zařízení v prostředí digitální továrny	64
4.6.	Simulace robotické výrobní linky	66
4.6.1.	Kinematizace svařovacích odporových kleští.....	66
4.6.2.	Simulace dostupnosti svařovacích odporových kleští	69
4.6.3.	Simulace dostupnosti svař. odporových kleští včetně robota...71	
3.1.1.	Simulace robotické buňky	72
4.6.4.	Virtuální zprovoznění	73
5.	Optimalizace výběru svařovacích odporových kleští	76
5.1.	Simulace dostupnosti na praktickém příkladu	76
5.2.	Vyjádření optimalizační úlohy.....	79
5.3.	Optimalizace pomocí globálního algoritmu	81
5.3.1.	Varianta 1 – cena	81
5.3.2.	Varianta 2 – kombinace ceny a hmotnosti	88
6.	Důsledky pro vědu a praxi	95
7.	Diskuse výsledků a závěr	98
8.	Splnění cílů.....	101
9.	Seznam použité literatury	102
10.	Publikace autora.....	107
11.	Seznam použitých tabulek a obrázků	109



Seznam použitých zkratk

ANB	souřadnicový systém montážní desky umístěné na chapači (Anbauplatte)
Ar	Argon
CAD	počítačem podporované projektování (Computer Aided Design)
CAM	počítačem podporovaná výroba (Computer Aided Manufacturing)
CIM	komplex navzájem integrovaných CA (počítačem podporovaných) systémů (Computer Integrated Manufacturing)
CMT	druh obloukového svařování (Cold Metal Transfer)
CO ₂	oxid uhličitý
DF	digitální továrna (digital factory, digitale Fabrik)
DPE	systém pro plánování výrobního systému (Delmia Process Engineer)
EAWS	metoda pro vyhodnocení ergonomického rizika (European Assembly Worksheet)
FDS	Flow Drill Screw
FIFO	zásobník First In First Out
FMEA	analýza možných chyb a jejich vlivu (Failure Mode and Effects Analysis)
FZG	souřadnicový systém přípravku vztažený k nule vozu (Fahrzeugnull)
G	odporové svařovací kleště (Welding Gun)
GA	globální algoritmy
He	Hélium
IR	průmyslový robot (industrial robot, industrie Roboter)
LP	lineární programování
MEB	modulární elektro platforma (Modularer Elektro Baukasten)
MQB	modulární platforma s napříč uloženým motorem (Modularer Quer Baukasten)



MRK	spolupráce člověka s robotem (Mensch-Roboter-Kooperation)
MTM	analýza manuální činnosti (Methods Time Measurement)
OBS	odporový bodový svar
OLP	Off-line program
P-FMEA	procesní FMEA
PD	systém pro plánování výrobního systému (Process Designer)
PEP	plán vzniku výrobku (Produkt Entwicklungsplan)
PLC	programovatelný logický automat (Programmable Logic Controller)
PLM	životní cyklus výrobku (Product Lifecycle Management)
PQ	platforma s napříč uloženým motorem (Plattform Quer)
PS	systém pro simulaci výrobních prostředků (Process Simulate)
PVS	projektování výrobních systémů
RPS	systematika referenčních bodů (Referenc Point Systém)
SK	svařovací kleště pro odporové bodové svařování
SOP	start sériové výroby (Start of Production)
SpEq	spojovací ekvivalent (Füge Äquivalenz)
TCP	počátek souřadnicového systému nástroje (Tool Center Point)
TCPF	souřadnicový systém nástroje převzatý robotem (Tool Center Point Frame)
VC	virtuální zprovoznění (Virtual Commissioning)
VFF	start předsériové výroby (Vorserien Freigabe Fahrzeuge)
WP	odporový bodový svar (Welding Point)



1. Úvod

Automobilový průmysl je jedním z nejdynamičtěji se rozvíjejících oborů. Tlak zákazníka na výsledný produkt v posledních letech nabírá na intenzitě. Pokud chce automobilka tento tlak překonat, je nutné všechny oblasti vývoje a výroby optimalizovat a aktivně rozvíjet. Životní cyklus výrobku, v tomto případě automobilu, se postupem času zkracuje. Naopak počet možných variant stále stoupá. Jen ten, kdo dokáže včas a kvalitně zareagovat na požadavky trhu (zákazníků), může být v dnešním světě a v budoucnosti leaderem v produkci a prodeji automobilů.

Problematika návrhu výrobních linek v automobilovém průmyslu je velice obsáhlá. Pokrývá oblasti od lisování dílů, svařování jednotlivých celků až po kompletní karosérii, lakování karosérie a montážních dílů s konečnou montáží vnitřních a vnějších dílů v hotový automobil. Důležitou součástí výroby je samozřejmě také výstupní kontrola s jízdní zkouškou.

Tato disertační práce se zabývá návrhem výrobních systémů a používanými metodami. Výrobní systém je podroben rozboru se zmapováním jednotlivých ovlivňujících faktorů.

Se stále větším vlivem výpočetní techniky při vývoji výrobku, plánování a realizaci samotného výrobního zařízení se dostávají do popředí různé simulační metody. V této práci jsou představeny možnosti použití simulačních metod pro oblast optimalizace v konstrukční fázi a způsob řešení dané situace pomocí matematického programování a globálních algoritmů.

Z výše popsaných důvodů je disertační práce omezena pouze na problematiku výroby karosérie v karosářsko-montážním závodě.



2. Současný stav řešené problematiky

V této kapitole mapuje autor disertační práce aktuální stav problematiky výrobních systémů, návrhu výrobních linek a použitých simulačních nástrojů, které ulehčují a zpřesňují výsledný návrh výrobní linky.

Tato kapitola je rozdělena do 4 částí. První část se věnuje výrobním systémům, konkrétně systému štíhlé výroby a Toyota Production Systém. Druhá část je zaměřena na problematiku projektování výrobních systémů, na kterou navazuje kapitola věnovaná problematice simulací výrobního procesu. Poslední část se zabývá problematikou řešících algoritmů, které jsou použity při řešení úloh zapsaných v matici nebo řešících volbu vhodného výrobního nástroje.

2.1. Výrobní systémy

Pod výrobním systémem si můžeme představit souhrn principů, metod a postupů, které směřují k naplnění vize, hodnot a strategie firmy. Představuje nástroj pro realizaci podnikatelské strategie.[1]

Principy výrobního systému:

1. Dlouhodobá filozofie
2. Správné procesy produkují správné výsledky
3. Rozvoj lidí a partnerů
4. Průběžné řešení klíčových problémů a celoživotní vzdělávání

Jednou ze základních charakteristik výrobního systému je flexibilita, a to na všech úrovních. Flexibilitu můžeme zařadit mezi významné konkurenční výhody. Flexibilita znamená schopnost vyrábět a montovat dané nebo budoucí spektrum výrobků v libovolném pořadí a množství.

Proč potřebujeme flexibilní systém:

1. Je příliš složité předpovídat požadavky zákazníků
2. Krátké životní cykly a kolísavé požadavky
3. Variantní výroba a malé dávky

4. Rychlost dodávky
5. Zakázková výroba

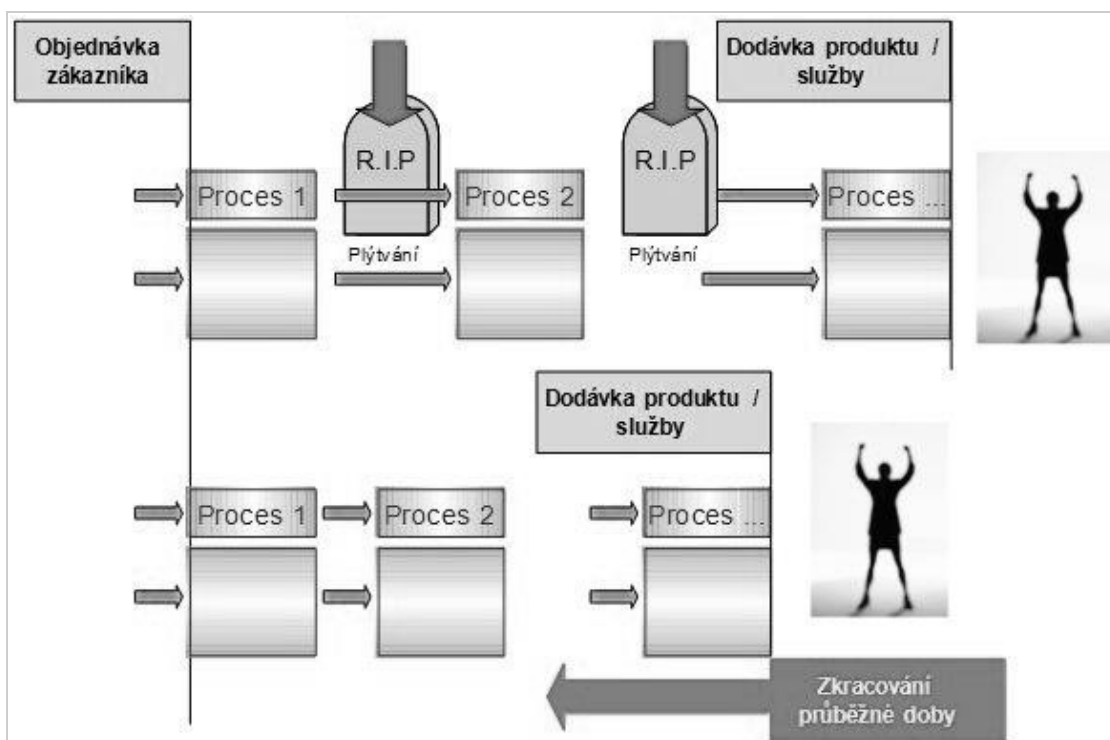
2.1.1. Lean Production (štíhlá výroba)

Základní myšlenkou každé nové výrobní strategie je postupné redukování plýtvání a zvyšování produktivity.[2] Hlavní oblasti, ve kterých lze uplatnit pravidla „štíhlé výroby“ jsou zobrazeny na Obrázku 1.



Obrázek 1 - Štíhlá výroba

Štíhlý a inovativní podnik je jedním z možných směrů při efektivizaci podniku. Štíhlost podniku je charakteristická soustředěním na činnosti, které přidávají hodnotu zákazníkovi a eliminují všechna plýtvání a ztráty. Nesoustředujeme se však jen na výrobu, ale i na ostatní podnikové oblasti – vývoj, logistiku a administrativu, viz. Obrázek 1



Obrázek 2 - Ostatní podnikové oblasti

Každá z podobných aktivit musí stát na „pevných základech“, které jsou důležité pro realizaci každé změny. Tímto základem je kultura realizace a orientace na cíle. Nejčastější je zaměření na týmovou práci, systémy motivace a odměňování pracovníků, moderované workshopy, strukturované řešení problémů či efektivní řízení projektů.

Snahou eliminaci plýtvání je zkrátit průběžnou dobu výroby nebo realizaci služby. Krátká průběžná doba má velký vliv na flexibilitu, rychlost realizace zakázky, ale třeba i na snižování stavu zásob.

2.1.2. TPS (Toyota Production System) [3]

Výrobní systém Toyota TPS pomáhá členům týmu optimalizovat kvalitu prostřednictvím neustálého zdokonalování procesů a omezení zbytečného plýtvání přírodními, lidskými a podnikovými zdroji. TPS ovlivňuje každý aspekt organizace a jeho součástí je soubor společně sdílených hodnot, znalostí a postupů. Svěřuje zaměstnancům jasně definované zodpovědnosti v každém



kroku výrobního procesu a povzbuzuje jednotlivé členy pracovního týmu ve snaze o celkové zlepšování.

Hlavními znaky TPS jsou:

Just in Time

Náklady na skladové zásoby jsou minimalizovány tím, že jsou potřebné díly doručovány na místo jejich použití pouze tehdy, když jsou potřeba.

Eliminace plýtvání – zamezení čehokoli co nepřináší přidanou hodnotu – zahrnuje i faktory, které by normálně nemusely být považovány za plýtvání, jako například nadvýroba, držení příliš rozsáhlých zásob, nutnost repasování, zbytečné přesuny nebo čekání.

Kanbanová karta¹ je jednoduchý, snadno viditelný prostředek, který TPS používá k vyžádání dílů podle jejich potřeby. To znamená, že je v montážní oblasti udržována pouze minimální zásoba dílů. Předtím, než je potřeba doplnit zásoby, zajistí instrukce kanbanové karty jejich „just-in-time“ dodání. Proces je založen na „pull“ principu, kdy jsou položky vyžádány pouze v okamžiku potřeby, na rozdíl od principu „push“, který nemusí brát zřetel na aktuální potřebu.

Jidoka – zviditelňování problémů

Jidoka je princip pomáhající zvyšovat kvalitu výroby. Je založený na monitoringu kvality výrobního procesu v reálním čase.

Princip Jidoka uplatňovaný v TPS zabudovává kvalitativní kontroly do každého kroku výrobního procesu. Transparentností všech procesů pomáhá princip Jidoka zviditelnit veškeré abnormality a zajistí jejich okamžité řešení.

Jidoka se překládá jako „autonomatizace“ a lze ji popsat jako „automatizaci s lidským dotykem“. Kvalita je důsledně monitorována, každý člen týmu je zodpovědný za provedení kontroly kvality před předáním zpracovávaného zboží na následující stanoviště výrobní linky. Pokud je zjištěna závada nebo chyba, je neprodleně řešena – i kdyby to mělo znamenat přechodné zastavení výroby.

¹ Kanban - oznamovací karta, štítek, či v širším významu přímo informaci. Kanbanem (informací) může být přepravní bedna, identifikační místo na podlaze, v boxu nebo regálu.



Kaizen – neustálé zdokonalování

Kaizen jako výraz je složený ze dvou slov „kai“ - změna a „zen“ - dobrý, lepší, což celkově znamená změna k lepšímu. Kaizen je systém kontinuálního zlepšování v osobním, sociálním, ale také pracovním životě zahrnující jak dělníky, tak i manažery.

Kaizen znamená, že všichni členové týmu napříč celou organizací neustále hledají cesty ke zdokonalení pracovních postupů a tento proces zdokonalování je v podniku podporován lidmi na všech úrovních.

Kaizen není založen jen na zlepšeních, vyvíjených a implementovaných experty nebo vedením, ale naopak zapojuje úplně každého, spoléhající na široké znalosti, dovednosti a zkušenosti lidí pracujících přímo ve výrobním procesu.

Životní prostředí

Filosofie TPS také zahrnuje princip 3R (z anglického reduce, reuse, recycle) čili redukovat, znovu použít a recyklovat.

Omezení plýtvání při zpracování, zásobování, přepravě, nadvýrobě, přesunech a snížení počtu prodlev a výrobních vad přináší přímý ekologický prospěch.

Zdraví a bezpečnost

Úsilí dělat věci nejlepším možným způsobem by nemohlo být nikdy úspěšné, pokud by byla bezpečnost obětována ve prospěch zdánlivé efektivity. Když jsou procesy zdokonalovány za účelem zvýšení kvality, zvyšuje se také bezpečnost.

Při revidování procesů nebo zvažování nového vybavení hraje péče o lepší zdraví, bezpečnost a ergonomii zásadní roli.

2.2. Projektování výrobních systémů

Systémové i celkové pojetí projektování výrobních systémů vyžaduje využití metody postupného modelování zadaného úkolu. Tzn. tvorbu variant a jejich technické, organizační a ekonomické vyhodnocení. U složitějších úloh je zapotřebí využití simulací pro posouzení dynamické schopnosti koordinace



všech funkcí a prvků výrobního systému v čase, prostoru, kvalitativních a kvantitativních požadavků.[4]

Postupné modelování vychází z rozdělení komplexní úlohy na dílčí, relativně samostatné problémy, avšak při důsledném respektování vzájemných vztahů jejich jednotlivých prvků a funkcí. Z hlediska tohoto požadavku lze rozdělit úlohu technologického projektování do třech relativně samostatných modulů:

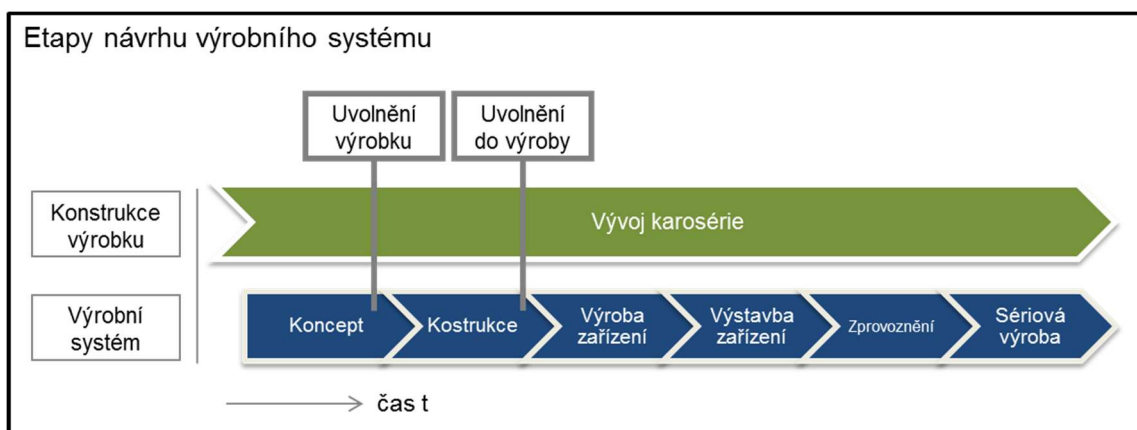
1. Modul výrobního procesu včetně kontroly
2. Modul manipulačního procesu
3. Modul informačního a řídicího procesu

Takto definované technologické projektování musí určit nejen jednotlivé prvky uvedených modulů, ale také jejich vzájemné vazby jak vnitřní, tak vnější. Požadavky na informační a řídicí moduly ve vazbách k modulům výrobního a manipulačního procesu rozdělují řešenou úlohu do dvou otázek a to na řídicí a řízený systém. Kromě toho musí být, pro všechny tři moduly, souběžně řešeny problémy pracovní síly ve výrobním procesu v rámci sociálního systému (kvalifikace, odbornost, pracovní prostředí atd.).

2.2.1. Projektování výrobních systémů v automobilovém průmyslu

Většina automobilek má podobné fáze projektování výrobních linek. S ohledem na zaměření disertační práce se dále bude přihlížet na projektování výrobní linky karosérie. Počet fází se v jednotlivých automobilkách liší, pohybuje se mezi 4-mi až 5-ti fázemi. Nejen počet, ale význam i názvy jednotlivých fází projektu se mezi výrobci automobilů liší.[5]

První fází je „koncepce linek“. Koncept (viz. Obrázek 3) se navrhuje na základě podobnosti s předchozím vyráběným modelem. V této etapě ještě nejsou k dispozici všechny konstrukční údaje nové karosérie. Koncept tvoří jen hrubý návrh zařízení s předpokládaným počtem operací bez detailního přiřazení jednotlivých operačních kroků.



Obrázek 3 - Výrobní systém v automobilovém průmyslu

Ke konci I. fáze dochází ke konstrukčnímu uvolnění výrobku, v našem případě karosérie. Uvolnění doprovází kompletní konstrukční dokumentace, která se skládá z:

1. 3D modelů jednotlivých dílů
2. Sestav svařenců a celé karosérie
3. Svařovacích rozvah – typy svarů a jejich poloha

Na základě těchto údajů je koncept detailně rozpracován. Projekt přechází do II. fáze „konstrukce výrobního zařízení“. V této etapě se konstruují jednotlivé výrobní přípravky a navrhují celé výrobní zařízení, které se dále polohují do výrobní haly.

Na konci fáze konstrukce dochází ke konstrukčnímu „uvolnění výrobku do výroby“. Tento milník definuje, že vývoj karosérie je z větší části ukončen. I nadále však vývoj karosérie pokračuje dalším zlepšováním. Ale po tomto uvolnění musí být jakákoliv změna konstrukce karosérie pokryta dodatečnými technologickými náklady.

Třetí fází je „výroba zařízení“. Zkonstruované zařízení je uvolněno pro zhotovení a současně se začíná s objednáváním částí výrobního zařízení od subdodavatelů (roboty, motory, zvedací technika atd.).

Další fází je „výstavba zařízení“. Vyrobené a dodané části výrobního zařízení se montují na předem navrženou plochu ve výrobní hale. Jednotlivé části se mezi



sebou propojí a celá výrobní linka se připojí ke zdroji elektrické energie a k jiným potřebným médiím (chladicí voda, stlačený vzduch).

Následuje fáze „zprovoznění“, čímž rozumíme oživení linky, tzn. propojení zařízení s řídicím prvkem. Nejprve je zařízení zprovozněno v tzv. ručním režimu, což znamená, že každý krok řídicího programu musí být ručně potvrzen. Postupně se ruční potvrzení kroků omezuje až k úplnému automatickému provozu.

V tomto období probíhají také veškeré zkoušky, podmiňující uvolnění výroby do sériového provozu. Mezi tyto zkoušky patří:

1. zkouška pevnosti spojů a jejich kvalita
2. měření rozměrů karosérie a jejich stabilita
3. náměry časů výrobního cyklu výrobku
4. zkouška funkčnosti
5. prokázání způsobilosti výrobního zařízení

Předáním dokončené výrobní linky úseku výroby a následnou výrobou karosérií nazýváme sériová výroba.

Plánování výroby je vícedimenzionální problém s optimalizací, kde je současně řešena řada dílčích problémů, jako je výběr výroby, umístění produktu, výrobní sekvence atd. Zde je pro řešení navržen zdokonalený genetický algoritmus vyvinutý pro hledání optimálního řešení. Experimentální výsledky prokázaly, že navržená struktura genetického algoritmu je lepší než konvenční. Je to proto, že pro genetický algoritmus je umožněno „učení se“ ze svých vlastních zkušeností.[6]

2.3. Simulace výrobních procesů

Simulaci (z latinského simulo, napodobit) můžeme pro potřeby PVS chápat jako proces inženýrského modelování systému (= výrobní proces nebo výrobní systém).



Simulace je výzkumná metoda, jejíž podstata spočívá v nahrazení zkoumaného systému simulačním modelem, se kterým provádíme pokusy s cílem získat informace o zkoumaném systému.

Simulační model je jiný dynamický systém, v němž nastávají události a stavy, jako ve zkoumaném (simulovaném) systému a to ve stejném pořadí, ale v jiných časových okamžicích.

Průběžná simulace je simulace reálného systému v čase.

Simulaci používáme v případě, že zkoumaný systém je natolik složitý, že neexistuje vhodná matematická metoda i popis úlohy.

Počítačová simulace patří do oblasti CIM, která simulaci poskytuje jednotné uložení dat pro mapování a dokumentaci procesů z používaných softwarů CAD/CAM dostupných na trhu, které jsou rovněž součástí CIM.

K simulaci, prováděné výpočetní technikou, se rozhodujeme z nutnosti globálního přístupu k řešeným problémům výrobních procesů a systémů, při současném zohlednění mnoha faktorů ovlivňující celý systém (vstupy, výstupy).[7]

Simulaci řešené úlohy je ve většině případech vhodné použít jako optimalizační nástroj. Simulací se buď potvrdí návrh výrobní linky, nebo se vytvoří jiné varianty řešení s následnou verifikací. Simulace se provádí na virtuálním datovém modelu zařízení a v době, kdy se může ovlivnit konstrukce zařízení bez nutných vícenákladů na změnu.[8]

Použití simulace pro podporu plánování výroby má značný potenciál umožňující včasného odhalení komplikací.[9] Simulace jsou běžně používány k ověření návrhu během pozdních fází vývoje produktu.[10] Poskytuje také schopnost testování výrobních kapacit, experimentovat se simulačním modelem a vytvořit různé scénáře.[9] Nicméně, některé výzkumy navrhuji systematickou fyzikální analýzu simulace v počátečních fázích návrhu. Existují také příklady s použitím různé simulace k posouzení výrobitelnosti produktu. Neexistuje však dostatečný výzkum, který zkoumá použití simulačních nástrojů, které mohou podporovat hodnocení předběžných výrobních operací, které využívají různé výrobní zdroje k výrobě stejně vznikajícího druhu produktu.[10]



Stále většího významu dosahují simulace při integraci nového produktu do stávajícího výrobního zařízení. Možnost vložení virtuálních dat produktu do digitálního dvojčete výrobní linky v době konstrukce tohoto produktu, umožní navrhnout ideální rozmístění svarů z pohledu výrobní linky. Tímto lze navrhovaný produkt ovlivnit tak, že konečná úprava výrobní linky je minimální. Značně se sníží náklady a potřebný čas na úpravu zařízení.[11]

Simulace výrobní linky, konkrétně komplexního montážního systému s paletovým dopravníkem je analyzována např. v [12]. Požadavku identifikace slabých míst výroby, označovaných anglickým výrazem „bottleneck“, je dosaženo vytvořením simulačního modelu pomocí simulačního jazyku SIMAN.

Při optimalizačních simulacích je optimalizační model vždy jakousi aproximací skutečného systému. Je tedy při tvorbě takového modelu nutné zvážit, jaké proměnné do modelu zahrnout, a které zanedbat.

Neméně důležitou úvahou, je způsob zisku parametrů simulačního modelu. Například při pohybu produktu výrobním procesem je možné vycházet z předpokládané rychlosti pohybu dané součásti či tuto rychlost reálně měřit a dostávat tak dokonalejší model. Vyžití sběru dat přímo z výrobní linky je použito v [13], kde data sbíraná z fungujícího systému umožňují účinné korekční zásahy.

Využití simulací výrobního procesu dochází také v prvotních fázích plánování nových výrobních linek, procesů či postupů. Simulační proces umožňuje již v rané fázi návrhu odhalit budoucí slabá místa a výhodně je tak před samotnou realizací eliminovat. Takovéto postupy se již dnes stávají téměř standardem při návrhu složitějších procesů. Implementace simulačních procesů do návrhu je popsána např. v [14], kde jsou pod pojmem „Digital Factory“ tedy digitální továrna objasněny postupy využívající simulaci výrobních procesů.

Zcela nové technologie, umožňující nový pohled na výrobní simulace, přináší aktuálně využívané prostředky virtuální reality. Přehledný popis využití těchto metod je shrnut v [15].



2.4. Řešící algoritmy vhodné k optimalizaci

Následující kapitola popisuje možné metody řešení optimalizace úlohy, pomocí kterých by bylo možné vyřešit optimální kombinaci svařovacích odporových kleští

2.4.1. Matematické programování [16]

Předmětem matematického programování je hledání extrémů (maxima, minima) funkce více proměnných, vázaných omezujícími podmínkami. Jedná se o hledání tzv. vázaných extrémů.

Funkce, pro kterou se hledá extrém, se nazývá účelová nebo také kriteriální funkce. Jestliže jsou omezující podmínky i kriteriální funkce lineární, jedná se o lineární programování (LP).

Úlohou LP je nalezení extrému lineární funkce, v níž jsou proměnné vázány soustavou lineárních omezujících podmínek:

$$m < n ; b_i \geq 0$$

$$\sum_{j=1}^n a_{ij}x_{ij} \leq b_i \quad \text{pro } i = 1, 2, \dots, m ; j = 1, 2, \dots, n ; x_j \geq 0 \quad (2.1)$$

$$F = \sum_{j=1}^n c_j x_j = \min \quad (2.2)$$

kde:

F – kriteriální (účelová) funkce

a – strukturní koeficient

b – požadavková čísla

c – známá proměnná

x – neznámá proměnná

nebo

$$m < n ; b_i \geq 0$$



$$\sum_{j=1}^n a_{ij}x_{ij} \geq b_i \quad \text{pro } i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n; x_j \geq 0 \quad (2.3)$$

$$F = \sum_{j=1}^n c_j x_j = \max \quad (2.4)$$

Všechny koeficienty a , b , c jsou reálná čísla. Řešení celočíselné úlohy má vždy horší optimalizační kritérium než řešení relaxované úlohy v oboru reálných čísel. Pokud je potřeba řešit celočíselnou úlohu pomocí LP, spočívá řešení v zanedbání podmínek celočíselnosti a upravení výsledků na celá čísla. Při tomto způsobu hrozí nebezpečí příliš velké chyby nebo dokonce k získání nepřipustného řešení.

Pro řešení LP problému je vhodné použít simplexovou metodu. Simplexová metoda umožňuje nalézt taková řešení, ve kterých kritériální funkce F nabývá optimální hodnoty. Při řešení se postupně přechází od jednoho základního přípustného řešení ke druhému, za současného snižování hodnoty kritériální funkce.

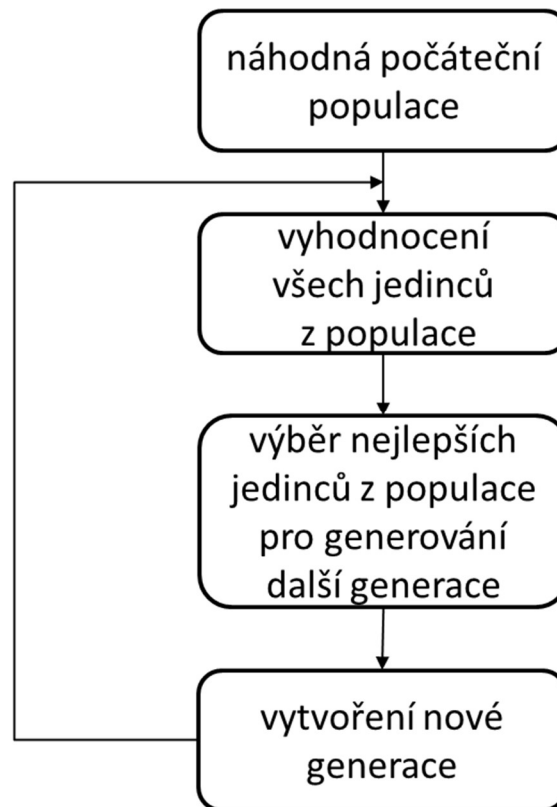
2.4.2. Globální evoluční algoritmy

Evoluční algoritmy patří mezi globálně optimalizační algoritmy, které jsou schopny přibližně řešit úlohy, jejichž exaktní řešení není v našich výpočetních silách nebo je extrémně časově náročné anebo vyžaduje lidskou intuici. Tyto algoritmy využívají principů známých z evoluční biologie, zejm. pak Darwinova principu „přežití silnějšího“.

Aby byla evoluce funkční, jsou nezbytné tři věci:

1. je nezbytné umět ze dvou existujících řešení vytvořit nové „zprůměrované“, této operaci se říká „křížení“
2. je nezbytné umět vytvořené řešení náhodně pozměnit, této operaci se říká „mutace“
3. je nezbytné pro vybraného jedince vybrat vhodného jedince ke křížení, této operaci se říká „selekce“ nebo „přirozený výběr“.

Tímto principem jsou často nalezena vysoce kvalitní řešení daných problémů – bez nutnosti toho, aby člověk musel vymýšlet specializovaný algoritmus, jak daný problém řešit. Jediné, co algoritmus potřebuje vědět, je, která řešení jsou silnější a která slabší. To je pro celou řadu problémů triviální určit, zatímco vyrobit dobré řešení může být nepřekonatelně obtížné.[17]

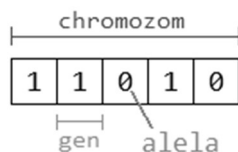


Obrázek 4 - Proces GA [17]

V různých problémech je vhodné řešení reprezentovat různými způsoby. Celý vektor, který reprezentuje řešení, je nazýván chromozomem. Chromozom může být zadán jako:

- vektor binárních čísel (posloupnost jedniček a nul)
- vektor reálných čísel
- grafy či jiné objekty

Chromozom je skládán z genů, které mohou nabývat různých hodnot. Konkrétní hodnota genu je označována jako alela, viz Obrázek 5.



Obrázek 5 - Stavba chromozomu

Velikost genotypu může být i proměnlivá. Mutace i křížení by v takovém případě musely být vhodně navrženy, aby pracovaly s různě velkými chromozomy.[18]

Křížení

Jedním z nejčastějších způsobů křížení je metoda označována jako jednoduché křížení (Simple Crossover). Většinou je provedena s jedním, či se dvěma body, které jsou v chromozomu náhodně vybrány a geny se mezi těmito body vzájemně prohodí.[17]

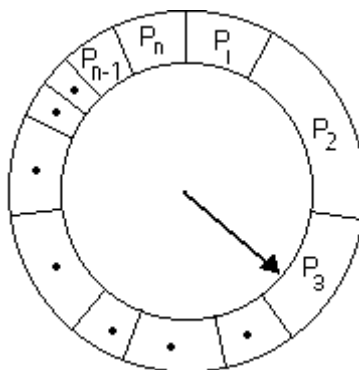
Mutace

Při mutaci by mělo platit, že k velkým změnám dochází s menší pravděpodobností než k malým změnám. Způsob mutace závisí na způsobu stylu reprezentace. Máme-li binární chromozom, mutaci lze provádět náhodným invertováním bitů. V případě chromozomu s reálnými čísly lze k hodnotám genů přičítat nahodilé hodnoty dané např. normálním rozdělením. Pokud reprezentujeme řešení grafem, mutací může být např. přidání uzlu, hrany, změna pořadí apod. [18]

Selekce

Obvykle používanou metodou výběru pro genetické algoritmy je volba ruletového kola. Představme si ruletu, která je rozdělena na různé díly. Velikost každého dílu odpovídá hodnotě fitness² jedince (viz. Obrázek 6). Když roztočíme ruletu, je vyšší šance, že bude vybrán větší díl. Jedinci s vyšším fitness mají vyšší šanci, že budou vybráni ke křížení a předají své geny.[17]

² Fitness – schopnost přežít jen u těch jedinců, kteří mají největší sílu



Obrázek 6 – Princip „Ruleta“

Analýza velkých dat byla úspěšně použita v mnoha oblastech, včetně řízení životního cyklu výrobků³, řízení dodavatelského řetězce a prediktivní údržby. Cílem je navrhnout optimalizaci obrábění z pohledu velkých dat. Každý obráběcí stroj je reprezentován jeho datovými atributy. Jakmile jsou data připravena, dochází k optimalizaci příslušných zdrojů. Tento přístup je ověřen zjednodušenou případovou studií, ve které jsou implementovány hybridní genetické algoritmy.[19]

2.4.3. Pravděpodobnostní metody

Nalezení optimálního řešení či množiny těchto řešení je možné s využitím pravděpodobnostních přibližných metod, někdy také označovaných jako metody Monte-Carlo. Tyto metody lze dle uplatňujících algoritmů rozdělit na:[20]

- Horolezecký algoritmus (Hill Climbing),
- Horolezecký algoritmus s náhodnými restarty (Hill Climbing with Random Restarts),
- Náhodná optimalizace (Random Optimization),
- Simulované žíhání (Simulated Annealing).

Široce využívaný je Hill Climbing algoritmus vhodný primárně pro funkce jedné proměnné. Proces vytváří řešící smyčku, která v okolí nalezeného řešení hledá další řešení, která jsou přesnější než předchozí. Nové, přesnější řešení

³ Životní cyklus výrobku se sestává z 5 fází, z nichž každá je pro různé produkty odlišně dlouhá: vývoj; uvedení na trh; růstová fáze; fáze zralosti; úpadek. Je velmi důležité, aby management společnosti věděl, v jaké fázi se výrobek nachází a podle toho volil správnou strategii pro co nejdelší udržení výrobku na trhu.[40]



poté zaujme místo původního výsledku a celý cyklus se opakuje. Nevýhodou tohoto algoritmu je možnost nalezení zdánlivého řešení v místě lokálního extrému funkce. Pro potřeby využití při hledání řešení funkcí více proměnných lze tento algoritmus upravit a využít i v těchto případech.

Algoritmus Hill climbing with Random Restarts je rozšířením původní metody, zajišťující prevenci uvíznutí metody v lokálním extrému.

Náhodná optimalizace je proces velmi podobný náhodným restartům. Procedura je ale složitější ve výběru nového iniciačního místa metody.

Metoda s názvem Simulované žíhání opět eliminuje možnost uváznutí algoritmu v lokálním extrému a to tím, že hledané řešení není nutně vhodnější než předchozí. Velké změny k méně vhodnému řešení z počátku řešení algoritmu umožňují nalézt žádaný globální extrém.

2.4.4. Metody kolektivní inteligence

Mezi algoritmy využívající kolektivní inteligenci, patří například tzv. optimalizace hejnem částic, anglicky swarm optimization. Jde o analýzu systému, kde se předpokládá, že se navzájem ovlivňují pouze sousední prvky. Jako celek se systém ovšem vyznačuje velmi složitým chováním.

Výhodou těchto algoritmů bývá nízká výpočetní náročnost a schopnost poskytnout v krátkém čase přibližné řešení.

Princip metod kolektivní inteligence představuje řešení problému za použití náhodně inicializovaných možných řešení s různou akurátností. Postupnou změnou polohy jednotlivých řešení a zásadou, že přesnější řešení ovlivňují ty méně přesná, což vede ke konvergenci metody.[21]

2.5. Shrnutí a dílčí závěr

První část rešerše je věnována přehledu výrobních systémů užívaných v automobilovém průmyslu, která navazuje na část druhou a to jejich projektování. V kapitole 2.2. je problematika projektování výrobních systémů v automobilovém průmyslu zhodnocena v rámci jednotlivých etap. Na oblast



projektování je zde nahlíženo jako na vícedimenzionální problém s řadou dílčích problémů, které je nutno optimalizovat.

Kapitola 2.3. je věnována aktuálnímu stavu simulací výrobních systémů a jejich důležitostí při projektování výrobního zařízení a materiálového toku. Je zde uvedeno několik příkladů, ve kterých byla simulace úspěšně použita. Simulace slouží také jako vhodný nástroj při hodnocení více variant výrobních nástrojů k výrobě stejného produktu.

Autor této disertační práce se chce konkrétně zaměřit na simulaci dostupnosti svařovacích odporových kleští, která není v dostupné odborné literatuře podrobně popsána. Hlavní problém vidí autor disertační práce ve volbě takové kombinace svařovacích odporových kleští, která vyhovuje bezkoliznosti a dalším parametrům výběru, jako např. min. pořizovacím nákladům.

Z výše popsaného důvodu se autor disertační práce v kapitole 2.4. zaměřuje na řešící algoritmy, pomocí kterých by bylo možné vyřešit optimální kombinaci svařovacích odporových kleští. V tomto případě je nutné řešit úlohu globální optimalizace s celočíselnými vstupními podmínkami (počet svařovacích odporových kleští nemůže nabývat hodnoty zlomku). Globální optimalizací se rozumí hledání extrému v celém parametrickém prostoru úlohy. Nejblíže k tomuto je úloha lineárního programování, která také řeší globální extrém, ale pracuje v oboru reálných čísel a přechod k celočíselným hodnotám není triviální. Pravděpodobnostní metody a metody kolektivní inteligence jsou vhodné k řešení lokální optimalizace, při rozšíření na globální může docházet k nepřesnostem. Z tohoto důvodu se v technické praxi s úspěchem používají heuristické metody, jako v kapitole 2.4.2. popsaná metoda globální evoluční optimalizace.

Autor disertační práce se proto rozhodl řešit výběr optimální kombinace svařovacích odporových kleští pomocí metody globální evoluční optimalizace.



3. Cíle disertační práce

V dnešní době prochází automobilový průmysl řadou změn. Kromě optimalizací a inovací v oblasti pohonů, které jsou motivovány přísnými cíli snížení emisí CO₂, je důležité zajistit růst prostřednictvím kratších životních cyklů výrobků a zvýšením počtu modelů, tříd a derivátů. Lze uvést např. situaci z roku 2005 z firmy ŠKODA AUTO a.s. kdy byla vyráběna karosérie Škoda Octavia II generace na samostatné výrobní lince. Octavia III generace již byla vyráběna společně s modely Škoda Rapid a Seat Toledo, kdy bylo výrobní zařízení prvně flexibilní, a to tak, že byla zkombinována výroba platformy typu MQB a PQ. Dnes se připravuje výroba prvního plně elektrického vozu Škoda do této výrobní linky. Takže zařízení bude schopné vyrábět další typ platformy a to MEB.

Projektování výrobního systému svařovny je z těchto důvodů vystaveno velkým nárokům na kvalitně vypracovaný projekt, ve kterém je nutné zohlednit mnoho faktorů a variant řešení. K tomu se dnes s oblibou používají systémy digitální továrny, které ulehčují projektantovi dílčí činnosti a umožňují vizualizaci procesů a systémů. Dalším stupněm jsou simulace návrhů a zkoumání více variant. Simulace jsou pro jednotlivé oblasti modelování dnes již možné a na trhu existuje mnoho systémů od různých výrobců.

V rámci digitální továrny jsou dnes známé procesy, kdy je možné prověřit vhodnost výrobních prostředků ve vztahu k výrobě (tedy i svařování) výsledného produktu. Tak je možno tyto prostředky simulovat až po konečné zprovoznění zařízení. Co však dnes ještě vyřešeno není, je výběr vhodných svařovacích odporových kleští na základě simulace dostupnosti tohoto nástroje.

Cíl disertační práce:

- 1. Navrhnout optimalizační metodu pro výběr vhodných svařovacích odporových kleští v rámci návrhu robotické výrobní linky**

Dílčí cíle:

2. Navrhnout a provést simulaci dostupnosti nástroje
3. Optimalizovat řešení simulace
 - a. Na základě ceny nástroje
 - b. Na základě kombinace ceny a hmotnosti nástroje.



Tímto způsobem bude možné vytvářet více variant kombinací nástrojů najednou, s možností výběru optimálního řešení při dodržení požadovaných podmínek. Činnost projektanta výrobního zařízení se tímto zredukuje při současném zohlednění několika faktorů najednou. Tento způsob není projektant v dnešní době, při dodržení předepsaných termínových plánů, schopen zvládnout. Zohledněním mnoha variant se zároveň zpřesní samotný návrh. Vedení projektu bude schopné rozhodovat pružněji, jelikož budou k dispozici výsledky více parametrů a jejich kombinací. Tímto se dosáhne redukce projektových i konstrukčních nákladů.

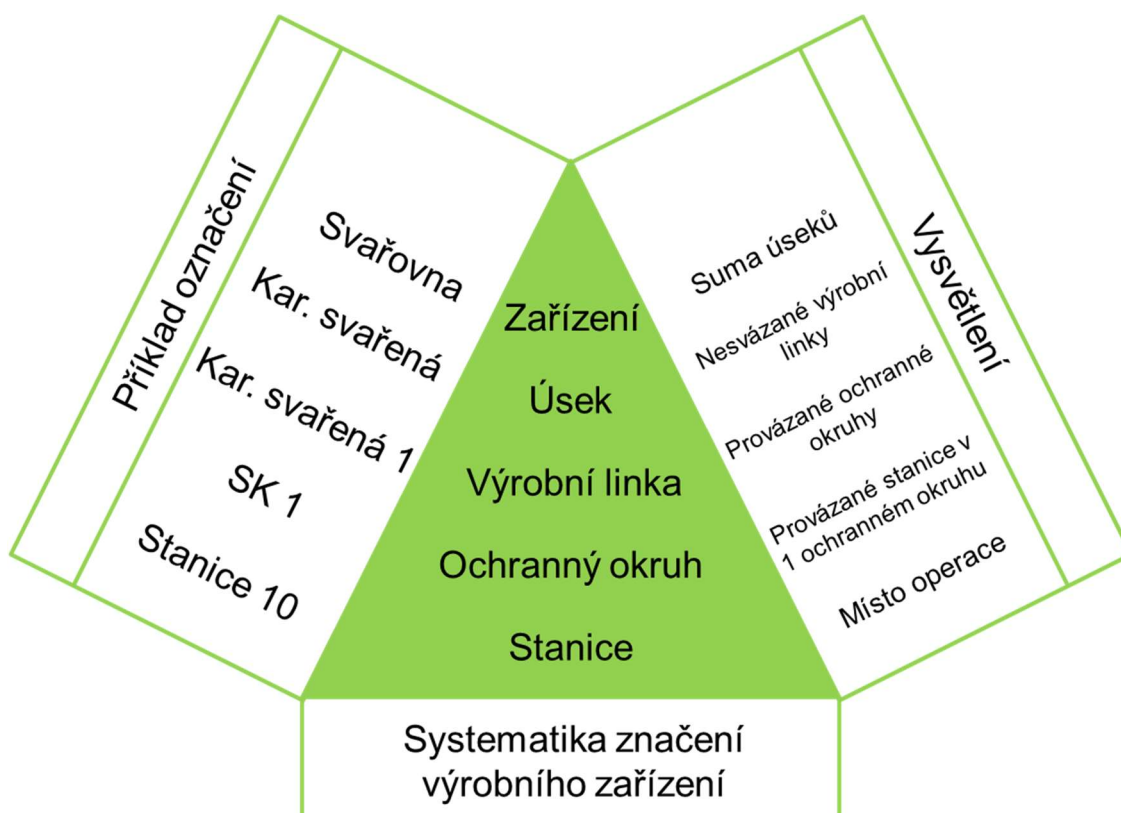
4. Projektování svařovacího výrobního zařízení

V této kapitole bude popsán proces výroby karosérie a nejčastěji použité spojovací technologie. Proces plánování svařovacích linek bude popsán na příkladu z automobilky ŠKODA AUTO a.s. a bude doplněn o zpracování pomocí nástrojů digitální továrny včetně simulací výrobních prostředků.

4.1. Struktura procesu výroby karosérie

Při projektování výrobního závodu se užívá nejrůznější terminologie k popisu výrobního procesu ve svařovně. Obrázek 7 ukazuje nomenklaturu používanou v automobilovém průmyslu s příklady a vysvětlením.[22]

Stanice jsou mezi sebou na přímo provázány, mezioperační zásoba dílů se zde nenachází. Výrobní linkou rozumíme určitý počet ochranných okruhů, které jsou svázány mezioperačními zásobníky. Výrobní úsek je množství několika výrobních linek. Součet všech výrobních úseků udává kompletní výrobní zařízení, svařovnu.



Obrázek 7 – Schématické znázornění struktury svařovny [22]

V automobilovém průmyslu se vozidlo vytváří postupně v procesu výrobního řetězce. Tento řetězec zahrnuje čtyři relevantní sekce, viz. Obrázek 8:

- Lisovna
- Svařovna
- Lakovna
- Montáž

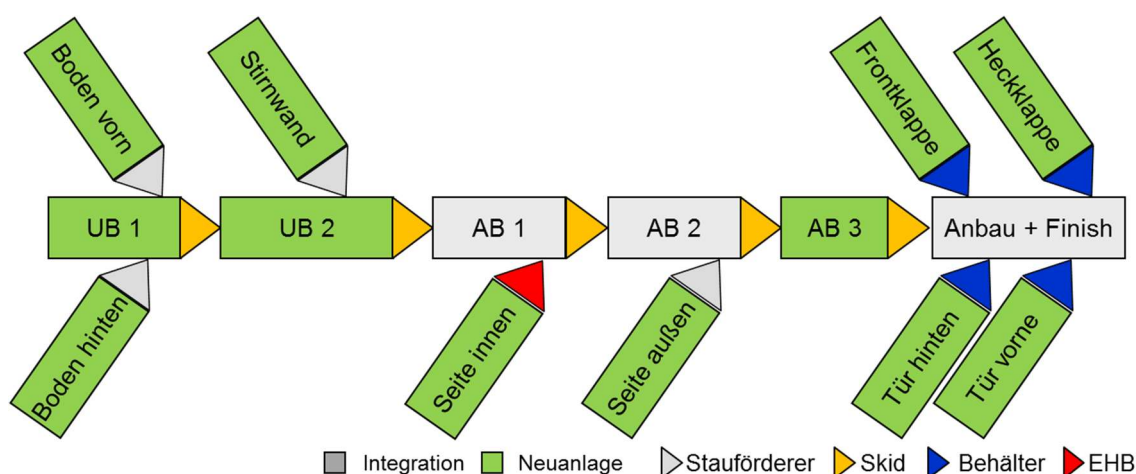


Obrázek 8 – Schéma výrobního řetězce

Svařovna je obvykle vysoce automatizovaná oblast uvnitř řetězce a je ve vnitřním vztahu zákazníka a dodavatele mezi lisovnou a lakovnou. Lisovna vyrábí plechové díly požadované v karosérii a je tedy dodavatelem svařovny. Výroba je v lisovně orientovaná na dávky, kdežto výroba ve svařovně je kontinuální. Tento rozdíl je nutné funkčně řídit logisticky. Proto je nutné na lisovně optimálně stanovit velikosti dávek a počítat s dostatečnými skladovacími prostory.

Následným procesem po svařování je lakování. V lakovně se karosérie opatřuje povrchovými úpravami ve víceetapovém procesu. Aby byl tento proces ekonomický a optimálně využit, je nutné karosérie dodávat kontinuálně. Z toho plyne požadavek na vysokou využitelnost zařízení celé svařovny. Poruchy nebo nepravidelná výroba ve svařovně se přímo promítá na další stanice výrobního řetězce. K eliminaci této problematiky slouží zásobníky karosérií mezi svařovnou a lakovnou. Úkolem těchto zásobníků je nejen plynulá dodávka karosérií, ale také možnost tvořit barevné bloky, které umožňují lakování více karosérií v jedné barvě a tím ke snížení doby přechodu na jinou barvu.

Toto strukturní oddělení výroby se používá mezi jednotlivými výrobními úseky. Schéma jednotlivých výrobních úseků je znázorněno na Obrázku 9.



Obrázek 9 - Výrobní úseky ve svařovně Škoda Rapid (vysvětlení v Tabulce 1)

Tabulka 1 - Vysvětlení pojmů výrobních úseků

Označení výrobního úseku DE	Označení výrobního úseku CZ
Boden hinten	Podlaha přední
Boden vorn	Podlaha zadní
UB 1	Platforma 1
Stirnwand	Příčná stěna
UB 2	Platforma 2
Seite innen	Rám dveří vnitřní
AB 1	Karosérie svařená 1
Seite außen	Rám dveří vnější
AB 2	Karosérie svařená 2
AB 3	Karosérie svařená 3
Frontklappe	Motorová kapota
Tür hinten	Dveře zadní
Tür vorne	Dveře přední
Heckklappe	Zadní víko
Anbau + Finish	Montáž panelových dílů + finiš



Tabulka 2 – Vysvětlení pojmů materiálového toku

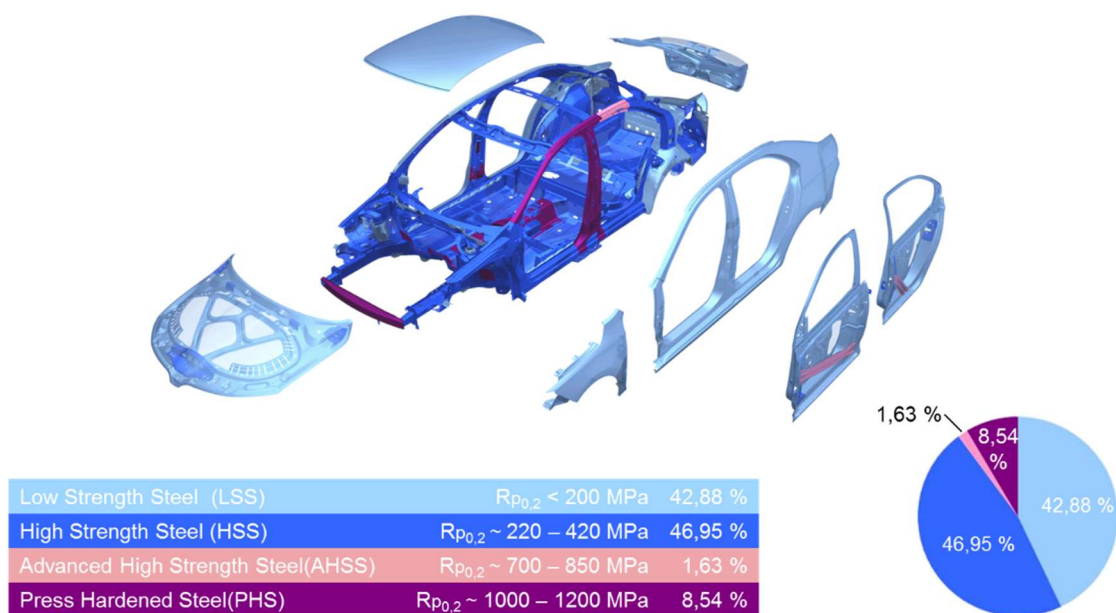
Materiálový tok DE	Materiálový tok CZ
Stauförderer	Mezioperační zásobník FIFO
Skid	Skidový dopravník
Behälter	Mezioperační přepravka (paleta)
EHB (Elektro-Hängen-Bahn)	Podvěsný dopravník

V úseku platformy se vyrábějí jednotlivé podskupiny pro podlahu. Výsledným svařencem platformy je „svařená podlaha“ (UB 2), která dále pokračuje do úseku „karosérie svařená 1“ (AB 1), viz. Obrázek 9. Zde se nejprve připraví podskupiny „rámy dveří vnitřní a vnější“, „výztuhy střechy“, „střecha“ a „zadní čelo“. Produktem poslední stanice je „karosérie svařená 3“ (AB 3), která ještě nemá panelové díly. Panelové díly, kterými jsou „přední kapota“, „blatníky“, „přední a zadní dveře“ a „zadní víko“, se montují na úseku „finiše“. V tomto posledním úseku dochází po montáži k optické kontrole ve světelném tunelu. Kontrolují se nerovnosti, tolerance spár a různá poškození, která mohla vzniknout při výrobě. Lehké deformace lze odstranit přímo v toku výroby, rozsáhlejší jsou opravena v boxu. Montáž panelů a ostatní úkony na finiši jsou většinou manuální činnosti, neboť to může provádět hlavně proškolený personál. Tato závěrečná činnost zaručuje, že ze svařovny jsou do lakovny předány jen kvalitní karosérie.

4.2. Používané spojovací technologie

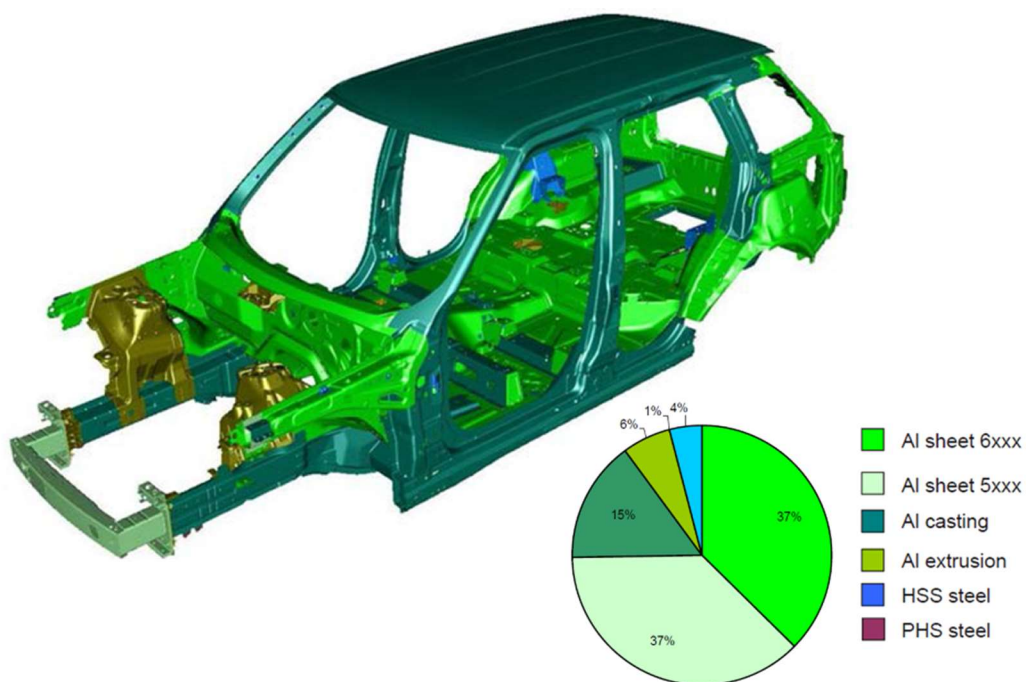
V dnešní době jsou hromadně vyráběné karosérie buď jen z ocelových plechů, nebo jsou použity kombinace ocelových plechů s jinými kovovými materiály, nejčastěji hliníku.

Poměr použitých jakostí oceli je ukázán na příkladu v Obrázku 10, kde je rozpad karosérie Škoda Rapid.



Obrázek 10 - Použití oceli na karosérii Škoda Rapid [23]

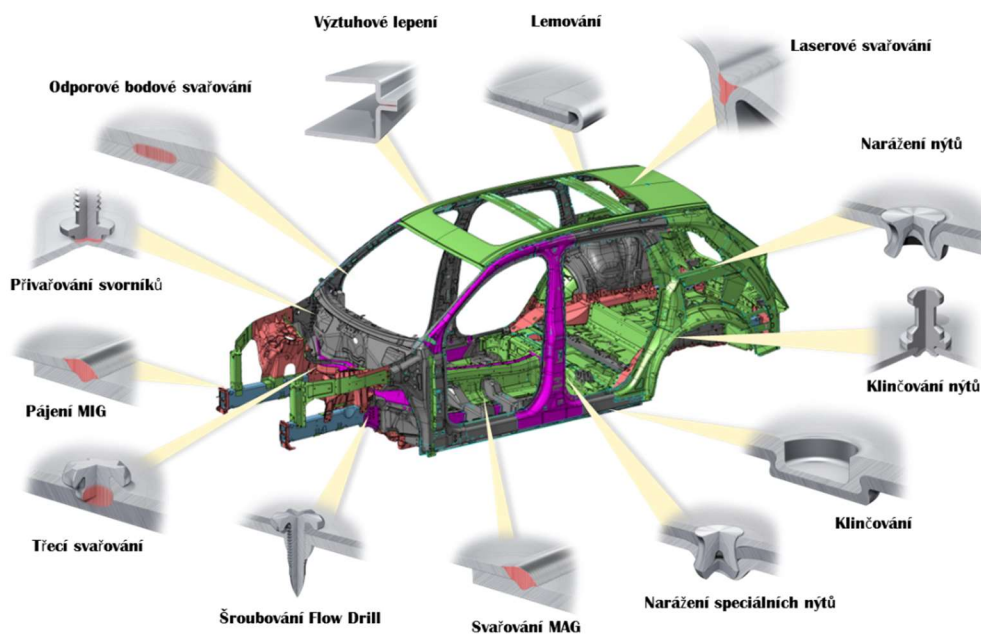
V největší míře jsou použity hlubokotažné oceli a konvenční oceli. V tzv. crashových zónách (tj. oblasti, které při kolizi auta musí bezpečně ochránit posádku vozu) se používají pokročilé vysokopevnostní oceli a vysokopevnostní za tepla tvářené oceli.[24]



Obrázek 11 - Smišená karosérie Range Rover [25]

Jak ukazuje Obrázek 11, existují i karosérie smíšené, kde hlavním materiálem jsou Al slitiny (viz. 5xxx, 6xxx). Jen v určitých oblastech je použita ocel.

Při výrobě karosérie jsou využity nejrůznější metody spojování dvou a více plechů. Základní přehled je zobrazen na Obrázku 12.



Obrázek 12 - Spojovací technologie při výrobě karosérie

Přehled jednotlivých typů spojů na karosérii z oceli je ukázáno v následující tabulce, viz. Tabulka 3.

Tabulka 3 - Počty a délky spojů u karosérie Škoda Rapid [23]

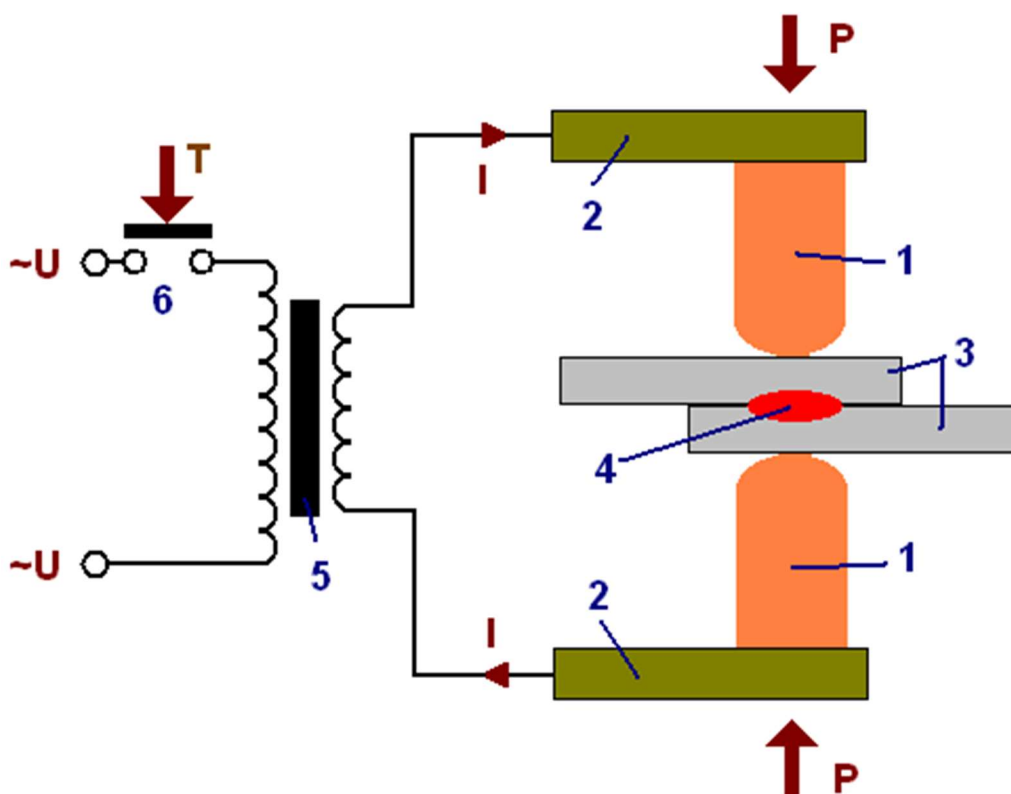
Spojovací technologie	Počet nebo délka spojů
Odporové bodové svařování	4264 ks
MIG pájení	1005 mm
MAG svařování	3210 mm
Přivařování svorníků	311 ks
Pájení laserem	6005 mm
Výztuhové lepení	78347 mm

4.2.1. Odporové bodové svařování

Nejpoužívanější technologií spojování ocelových plechů při výrobě karosérie je odporové bodové svařování. V největší míře se svařují 2 plechy a 3 plechy, vyskytují se však i čtyř plechové spoje. Tuto technologii lze celkem výhodně robotizovat. V dnešní době lze touto technologií roboticky svařovat i hliníkové plechy.

Svařování elektrickým odporem je komplexní elektromechanický proces. Teplo potřebné ke sváření dvou součástí vzniká přímo v nich i v místě jejich styku procházejícím elektrickým proudem. Spojení provádí větší nebo menší tlak během ohřevu nebo k jeho konci. Odporový svar se vytvoří, je-li materiál ve stavu plastickém nebo tekutém. Z toho vyplývá, že rozsah svářecích teplot je značný.

Charakteristickými vlastnostmi odporového svařování jsou velká rychlost procesu, není zapotřebí přídavného materiálu a je možno svařovat materiály jiným způsobem nesvařitelné.[H1]



Obrázek 13 - Schéma odporového bodového svařování [26]

Svařovaný základní materiál (3) (viz. Obrázek 13) je sevřen mezi elektrody (1). Elektrody jsou upevněny na přitlačná ramena (2) a jsou napájené ze zdroje



svařovacího proudu. Zdrojem svařovacího proudu v bodových svářečkách je obvykle výkonný transformátor (5) napájený ze sítě. Sekundární vinutí tohoto transformátoru tvoří jen pár závitů (obvykle jediný závit) silného měděného vodiče. U výkonných svař. zdrojů je sekundární závit chlazen vodou stejně jako ramena či elektrody. Důvodem jsou velké svařovací proudy pohybující se u průmyslových zařízení v rozmezí cca 1 až 150 kA. Sekundární napětí takového svařovacího transformátoru se pohybuje v rozmezí cca 2 - 20 V. Ke svaření materiálů dojde po sepnutí zdroje spínačem (6) na dobu t . Svařovanými materiály začne procházet vysoký elektrický proud I , který v místě jejich styku materiály nataví. Současně musí dojít k silnému stlačení ramen (2) silou F . V místě styku materiálů se tak vytvoří bodový svar (4). [27]

Svařovací odporové kleště lze rozdělit podle několika základních parametrů. Podle způsobu ovládání lze kleště rozdělit na kleště:

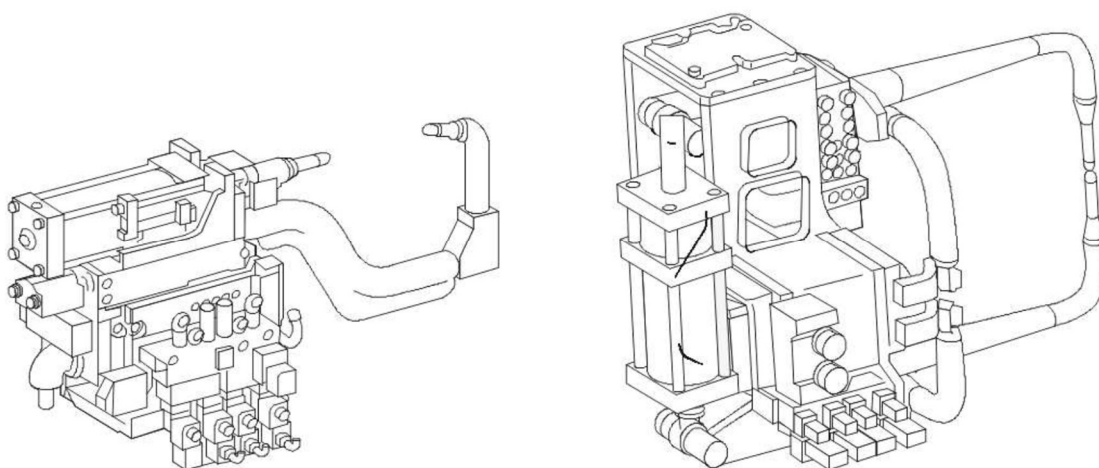
- Pneumatické – otevírání a zavírání kleští je realizováno pneumatickým válcem. Kleště mají dva základní režimy otevření – plné otevření a přivření. Rychlost otevírání a zavírání je nižší než u servokleští. Hlavní výhodou je relativně nízká cena
- Servokleště – mohou být servopneumatické nebo servoelektrické, dle použitého servomechanismu. Hlavními výhodami těchto svařovacích kleští je možnost libovolného otevření kleští, vysoká rychlost otevírání a zavírání a možnost individuálního nastavení síly sevření pro každý jednotlivý svar.

Dále lze svařovací odporové kleště rozdělit dle upevnění na:

- Pohyblivé – svařovaný díl je upnutý v nepohyblivém přípravku. Kleštěmi manipulujeme do pozice svaru.
- Stacionární – kleště jsou pevné a do pozice svaru manipulujeme se svařovaným dílem.

Poslední rozdělení je dle konstrukce čelistí:

- C kleště – konstrukce podobná stolařské svěrce, viz. Obrázek 14 vlevo. Využívají se pro svary v rovině kolineární s rovinou svářeče. Výhodou je vysoká rychlost otevírání a zavírání kleští a vyšší bezpečnost při manipulaci.
- X kleště – nůžková konstrukce kleští, viz. Obrázek 14 vpravo. Výhodou je dobrý dosah svarů v rovinách kolmých ke svářeči. Nevýhodou je menší rychlost otevírání a zavírání kleští v porovnání s C kleštěmi.



Obrázek 14 - Typy svařovacích odporových kleští, C vlevo, X vpravo [28]

Svařovací odporové kleště mají, kromě rozdělení výše, mnoho modifikací, které jsou dány konstrukcí samotných ramen. Délka, velikost a zakřivení ramen mohou mít různou konstrukci, čímž vzniká mnoho typů svařovacích kleští. Tyto konstrukční změny ramen vyplývají z konstrukce svařence, který je potřeba svařit odporovými bodovými svary.

Svařovací kleště jsou ovládané pomocí řídicího bloku. Svařovací odporové kleště použité v automatickém provozu jsou vybaveny průmyslovou sběrnicí, která zajišťuje komunikaci svařovacích kleští s nadřazeným systémem. Z řídicího bloku svařovacích odporových kleští jsou ovládané jednotlivé prvky kleští.

Otevření a zavření je realizováno pomocí operačního válce. Jelikož je tento válec dvojčinný, jsou možné dvě polohy otevření válce - plné otevření a přivření. Velikost lze nastavit přestavením zárážek válce. Plné otevření kleští slouží při manipulaci kleští do místa svaru. Při přivření kleští dochází ke změně otevření na



hodnotu blízkou zavření. Přivření se používá vždy před sevřením kleští. Pokud to dovoluje tvar součásti, je vhodné kleště mezi svary plně neotevírat. Dochází tak k úspoře času nutného pro svařování.

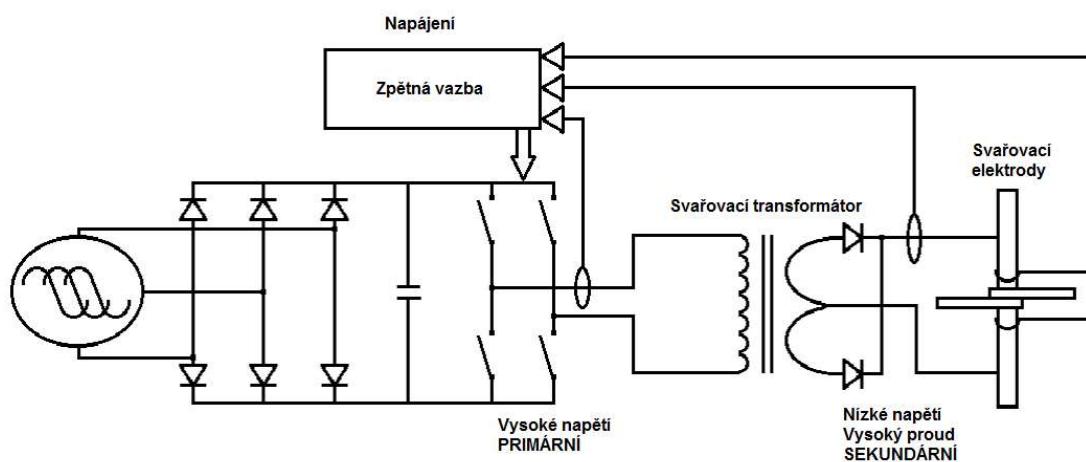
U svařovacích kleští typu X a C je jedna z elektrod nepohyblivá. Na základě této elektrody se manipuluje do místa svaru a druhá elektroda je k ní přitlačena. Nepohyblivou elektrodu není možné umístit v přesné vzdálenosti od svařovaného plechu, a pokud by elektroda byla pevná, mohlo by dojít k promáčknutí svařované součásti. Kvůli tomu je důležitou součástí kleští tzv. vyvažovací válec. Ten zajistí, že před sevřením kleští dochází k přivření stacionární elektrody na povrch součásti. Při zavření tak síla kleští svírá svařované díly, aniž by je jakkoliv deformovala.

Čerpadlo chladicí vody zajišťuje dostatečný průtok chladicí vody vnitřkem elektrod a zajišťuje chlazení transformátoru, tyristoru nebo jiných výkonových součástek v závislosti na použitém svařovacím zdroji.

Svařovací síla, která je důležitou veličinou odporového bodového svařování, byla v minulosti dána většinou napevno nastavením proporcionálního ventilu svařovacích kleští. V dnešní době je možné nastavovat svařovací sílu individuálně pro každý svar jako parametr ve svařovacím zdroji. Je však nutné používat servokleště, u kterých je možné programově měnit velikost síly. [28]

Vysokofrekvenční invertor, schéma viz. Obrázek 15, je jedním z nejpoužívanějších zdrojů pro bodové svařování. Zařízení je napájeno třífázovým elektrickým napětím ze sítě a toto napětí je následně usměrněno na stejnosměrné napětí. Stejnosměrné napětí je vyhlazeno pomocí kondenzátorového filtru a pomocí spínacích tranzistorů je generováno střídavé napětí o vysoké frekvenci, řádově 1–25 kHz, ve formě pulzů. Spínací tranzistory generující napětí ve formě pulzů jsou ovládané řídicím systémem svařovacího zdroje. Během svařování zdroj kontroluje celkový odpor mezi elektrodami, protékající proud a napětí mezi elektrodami. Změnou šířky pulzů je možné velmi rychle v řádu 10 μ s měnit výstupní proud. Svařovací zdroj je tak schopen v řádu desetin milisekund nastavovat svařovací parametry v závislosti na údajích ze zpětné vazby.

Střídavé napětí je přivedeno do transformátoru a transformováno na nízké napětí řádově 5–15 V a vysoké proudy 8–100 kA. Výhodou jsou široké možnosti řízení svařovacích parametrů, díky využití spínaného zdroje. Transformace elektrického napětí o vysoké frekvenci má vysokou účinnost, a s tím související malou spotřebu energie a kompaktní rozměry transformátoru. Kvůli malému množství ztrátové energie jsou menší nároky na chlazení v porovnání s transformátory převádějícími energii o nízké frekvenci.[28]



Obrázek 15 - Schéma vysokofrekvenčního invertoru [28]

4.2.2. Obloukové svařování tavící se elektrodou v ochranném plynu – MIG/MAG

Obloukové svařování je založeno na hoření oblouku mezi tavící se elektrodou ve formě drátu a základním materiálem v ochranné atmosféře plynu. [H2]

Ochranné plyny:

- Aktivní – metoda MAG (Metal Active Gas)
- Inertní – metoda MIG (Metal Inert Gas)

Napájení drátu elektrickým proudem je zajištěno třecím kontaktem v ústí hořáku tak, aby elektricky zatížená délka drátu byla co nejkratší. Drát je podáván podávacími kladkami, umístěnými v podavači, vlastním hořáku nebo kombinací obou systémů. Proudová hustota je u svařování MAG nejvyšší ze všech obloukových metod a dosahuje až $600 \text{ A} \cdot \text{mm}^{-2}$ a svařovací proudy se pohybují od 30 A až do 800 A u vysokovýkonných mechanizovaných metod. Teplota kapek



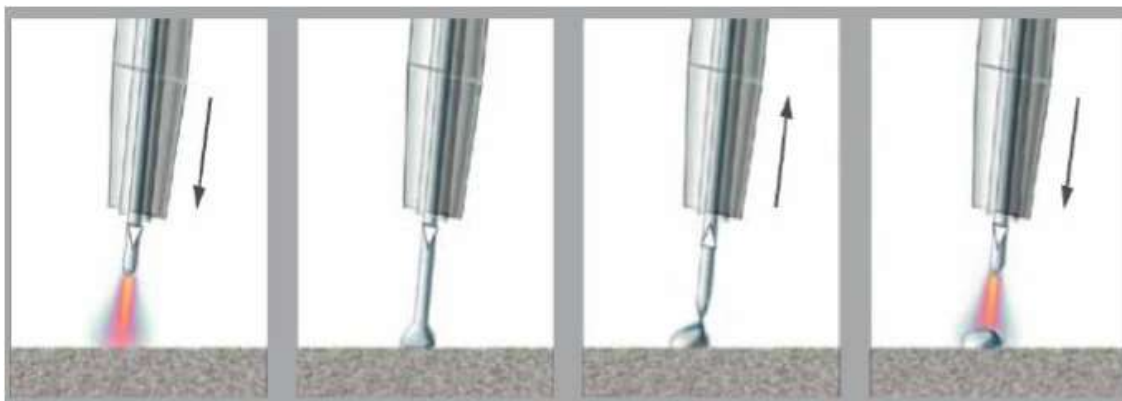
se při MAG svařování pohybuje v rozmezí 1700 až 2500 °C a teplota tavné lázně se v závislosti na technologii, parametrech svařování, chemickém složení a vlastnostech materiálu pohybuje mezi 1600 až 2100 °C. Jako ochranné plyny se používají Ar a He případně jejich směs pro metodu MIG a CO₂ pro metodu MAG.[29]



Obrázek 16 - Technologie obloukového svařování [26]

Metoda MIG je používána při svařování dílů z Al, při tvrdém pájení pozinkovaných ocelových dílů karoserie, kde dochází k natavení pouze přídavného materiálu a při svařování korozivzdorných materiálů. Metodou MAG jsou běžně svařovány podvozkové skupiny, části karoserií, centrální trubky, nárazníky, výfukové soustavy a mnoho dalších míst na automobilech, kde je požadovaná dlouhodobá spolehlivost nosných spojů.[30]

V současné době se při svařování metodami MIG/MAG rozšiřuje využití procesu CMT (Cold Metal Transfer). Při tomto procesu se drát nepohybuje pouze směrem k obrobku, ale dochází i k jeho opakovanému zatahování zpět. Drát se pohybuje směrem k obrobku až do doby, kdy dojde ke zkratu. Poté se směr pohybu drátu obrátí a drát se začne zatahovat zpět. Jakmile dojde k přerušení zkratu, směr posuvu se opět obrátí a celý proces začíná znova.



Obrázek 17 - Metoda CMT [31] (31)

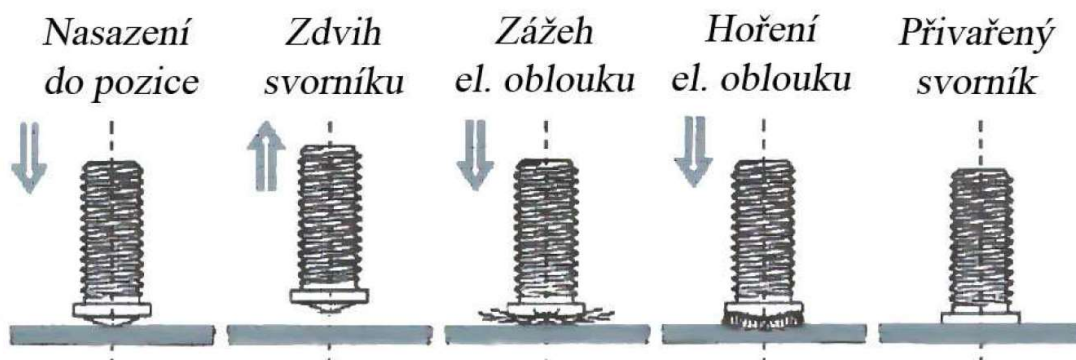
Posuv drátu však neprobíhá podle předem daného časového programu. Rychlost drátu i směr jeho pohybu jsou určovány dobou vzniku a přerušení zkratu. Pohyb drátu tedy rozhoduje o tom, co bude probíhat v tavné lázni a naopak pochody probíhající v lázni zase zpětně ovlivňují pohyb drátu. Výsledkem je oscilační pohyb s frekvencí až 70 Hz. Lze tak udržovat zkratový proud na velice nízké úrovni. Kromě toho nedochází k přerušení zkratu nekontrolovaně, ale zpětným zatažením drátu, což umožňuje mít přerušení zkratu pod kontrolou. Důsledkem toho jsou prakticky bezrozstříkové svarové, nebo pájené spoje. Minimalizace doby hoření oblouku pak omezuje množství tepla vstupujícího do svarové lázně. Toho je s výhodou využíváno při tvrdém pájení tenkých plechů.[31]

Dalším vývojovým stupněm je 2. generace s názvem CMT Advanced. Svařovací proces je založený na kombinovaném oblouku s kladně a záporně polarizovanými cykly CMT. Přepólování nastává ve fázi zkratu, aby oblouk zůstal stabilní. Během fáze záporné polarizace dosahuje svařovací proces vyššího odtavného výkonu a lepšího přemostění spár. V kladných cyklech tento postup záměrně vnáší do procesu teplo. Předání kapky probíhá přesně. Pohyb drátu je součástí procesu.[32]

4.2.3. Přivařování svorníků

Při této metodě svařování spolu působí přítlačná síla svařovací pistole v kombinaci s natavením styčné plochy svorníku a základního materiálu elektrickým obloukem (v některých modifikacích i pomocí elektrického odporu

nebo tření). Touto metodou lze přivařovat různé kovové komponenty jako šrouby, kolíky, matice, elektrokontakty atd. k základnímu kovovému materiálu. Podstatou je vytvoření svařovacího elektrického oblouku přímo mezi svorníkem a základním materiálem a jejich následné spojení po natavení.



Obrázek 18 - Přivařování svorníků [33]

Ve firmě ŠKODA AUTO a.s. jsou svorníky přivařovány kondenzátorovým přivařováním svorníků se zdvihovým zážehem, viz Obrázek 18. Tento proces začíná kontaktem svorníku s přilehlým místem svařování na základním materiálu, ve chvíli, kdy je iniciovaný svařovací cyklus. Přívod svařovacího proudu je aplikován do hrotu svorníku a ten je odtahován od svařovaného základního materiálu. Dochází tak k „natáhnutí“ elektrického oblouku a tím k natavení svorníku a přilehlého místa pod ním. Svorník je potom přitlačnou silou pružiny ponořen do roztaveného materiálu a tím je přivařen. Elektrický oblouk se zapálí na takovou dobu, než se dostatečně nataví obě spojované plochy (obvyklý čas je 0,2 až 1 s). Svorník se pak rychle přitlačí k základnímu materiálu, vypne se svařovací proud a tekutý kov ztuhne, čímž se vytvoří svarový spoj.[33]

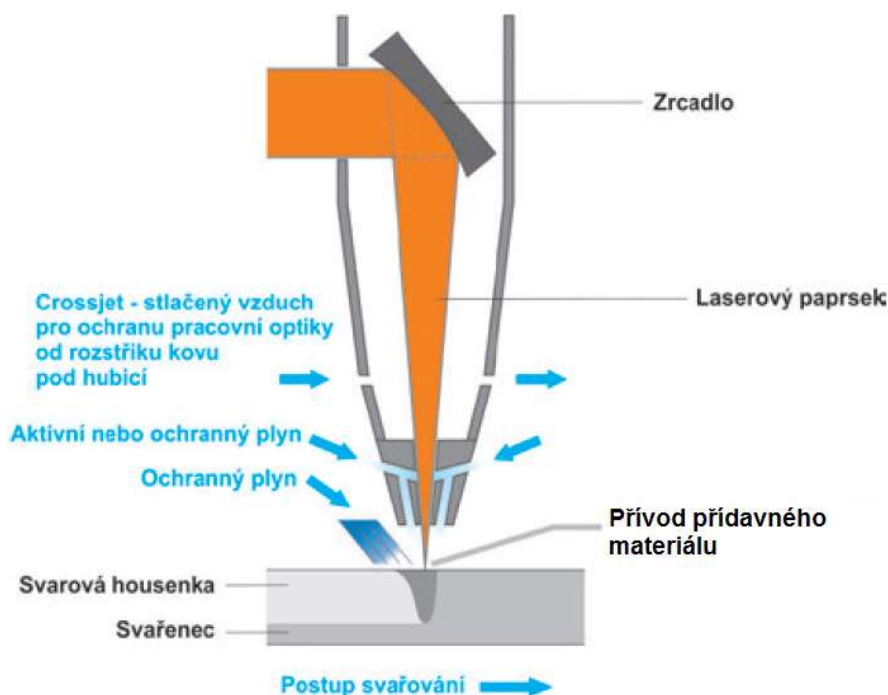
4.2.4. Laserové svařování

Název LASER vznikl z počátečních písmen anglického popisu samotné podstaty jeho principu činnosti Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation – zesílení světla stimulovanou emisí záření.

Při svařování laserem zvyšuje foton dopadajícího záření na povrch materiálu frekvenci vibrací mřížky a tím se zvyšuje teplota materiálu. Energie svazku záření dopadající na povrch se částečně odrazí, pouze část je pohlcena a využita pro

ohřev materiálu a velmi malá část materiálem prochází. Absorpce výrazně závisí na teplotě povrchu a vlnové délce generovaného záření. Pohlcená část záření proniká do povrchové vrstvy materiálu, přičemž hloubka průniku závisí na výkonu zdroje, vodivosti materiálu a frekvenci záření.

Rychlost ochlazování je díky malému vnesenému teplu vysoká a proto u ocelí nesmí překročit obsah uhlíku hodnotu 0,2%. Lasery umožňují velmi rychlý ohřev a svařování materiálů s vysokou tepelnou vodivostí – Cu, Ag, Al i materiály s vysokou teplotou tavení – W, Mo, Ta, Zr, Ti atd. Změna hustoty výkonu v dopadové ploše ovlivňuje rozměr i geometrii svarové lázně. Při malých hustotách do 10^6W.cm^2 dochází k přenosu tepla a formování svarové lázně hlavně vedením a je vhodné pro spojování tenkých plechů.[29]

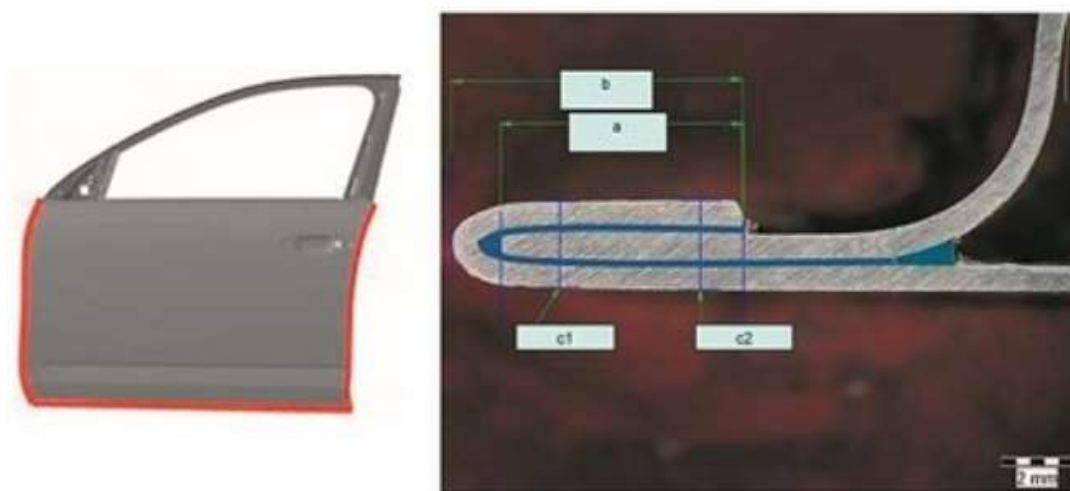


Obrázek 19 - Svařování laserem [34]

Laserového paprsku se využívá také k tvrdému pájení na karosářských dílech, kde spoje mají minimální rozměr a po zabroušení prakticky opticky zmizí, a ke svařování průvarem více vrstev bez přídavného materiálu. Pro svařování ocelových dílů nad tloušťku cca 5 mm se používá i tzv. hybridní svařování, kdy laserový paprsek zajišťuje ohřev do hloubky a el. oblouk (MAG) vyplňuje prostor svaru.[30]

4.2.5. Lepení

Stále větší důraz se klade na lepení kovových materiálů (ocel, Al). Většina lepidel je na bázi jednokomponentních materiálů. Tvrdidlo je rozpuštěno v pryskyřici. K aktivaci tvrdidla dochází při vyšších teplotách. Karosérie je vystavena vyšším teplotám při kataforetickém lakování, kde je vystavena teplotě okolo 180°C po dobu asi 20min. Takto dochází zároveň k aktivaci tvrdidla a zasíťování lepidla, tedy k vytvoření pevných adhezních i kohezních vazeb.[35]



Obrázek 20 - Lepený spoj [35]

Pro spojení a utěsnění povrchů plechů s výztuhami se při stavbě karosérie většinou používají kaučuková lepidla. Častými aplikacemi kaučuků jsou spojení vnitřních výztuh přední kapoty nebo střechy, přičemž se využívá antivibračních a tlumících vlastností tohoto druhu lepidel. Kaučuková lepidla jsou také aplikována na korozně exponovaná místa, kterými jsou ořezové hrany plechů apod. Další skupina lepidel je na bázi epoxidových pryskyřic. Tato lepidla navyšují celkovou tuhost karosérie, díky svým pevnostním vlastnostem. Převážně jsou aplikovány do lemových spojů panelových dílů (přední a zadní dveře, motorová kapota a zadní víko) nebo na spoje v oblasti podlahové části karosérie. Epoxidová lepidla vynikají kromě vysokých pevností dobrou přilnavostí, vysokou teplotou skelného přechodu a lze je aplikovat i na mastné povrchy.[35]

4.2.6. Lemování

Lemování je technologie tváření za studena, kdy ohybem okraje dílu vzniká zaoblení ostrých hran a zpevnění okrajů. Na karosérii se lemují povrchové díly s vnitřními díly, čímž dochází k vytvoření spoje a zaručující tuhost sestavy. Zpravidla jsou lemovány panelové díly a blatníky, u kterých se jedná o otevřený lem.

Lemování probíhá buď v hydraulickém lisu, kdy se na pracovní stůl a do beranu upne lemovací nástroj (viz. Obrázek 21), nebo za pomoci rolny připevněné na robotu a pevném loži. Hydraulickým lisem se lemuje celý lem najednou. Stroj je však konstrukčně náročný a investice je vyšší. Tohoto způsobu se používá při výrobě s velkou kapacitou.



Obrázek 21 - Horizontální lemovací lis [36]

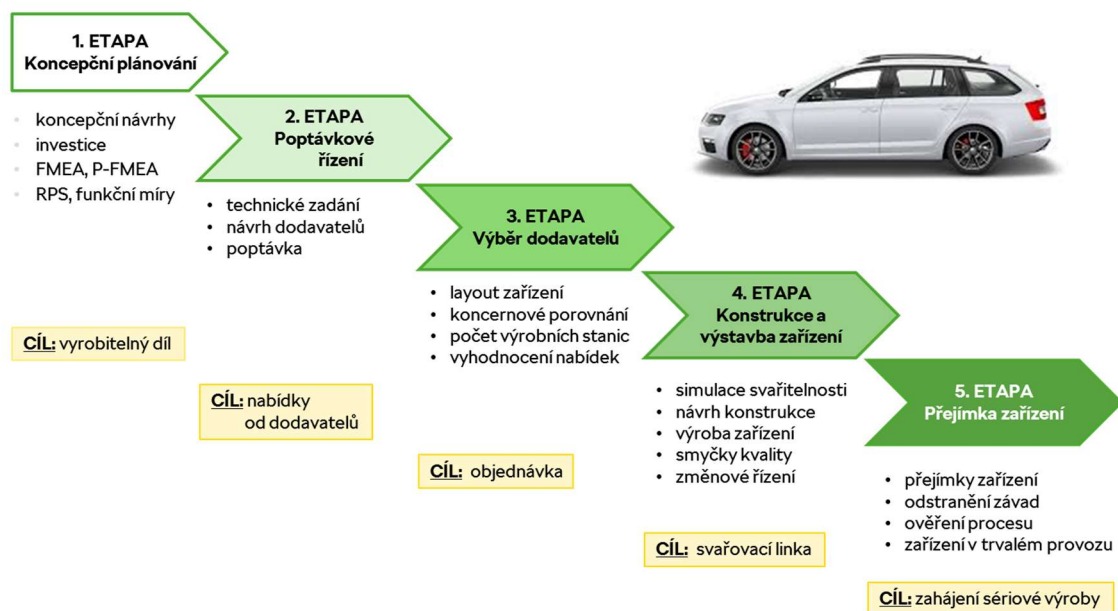
Pro nižší kapacitu výroby je vhodné použít rolnové lemování, viz Obrázek 22. Lem je vyráběn postupně a velmi často na více průjezdů rolny. Tímto způsobem můžeme zhotovovat i lemy, které nelze na hydraulickém lisu vyrobit.



Obrázek 22 - Rolnové lemování [37]

4.3. Proces plánování svařovacích linek

Projektování výrobního systému svařovacího zařízení bude dále popsáno na příkladu z české automobilky ŠKODA AUTO a.s. a skládá se z 5 etap.



Obrázek 23 - Etapy procesu plánování

1. ETAPA – Koncepční plánování

Po schválení projektu nového automobilu je nutné rozhodnout o místě výroby. Buď je celý automobil vyráběn v jednom výrobním závodě, nebo se jednotlivé



části vyrábějí v různých závodech. K tomuto rozhodnutí je nutné zohlednit požadovanou výrobní kapacitu a plochu a možnou synergii s jinými modely.

Jelikož nejsou v tuto dobu ještě dostupná konstrukční data karosérie, používají se konstrukční data z předešlého modelu nebo z modelu tomuto podobnému. Na základě těchto dat vzniká návrh možného uspořádání výrobního zařízení a návrh počtu výrobních operací, tzv. koncepční návrh. Ke konceptu je vytvořen kusovník výrobního zařízení a tato zařízení jsou oceněna. Součtem jednotlivých položek se dosáhne prvního odhadu potřebných investic.

V této etapě se stanovuje potřebná výrobní plocha. V případě, že v daném výrobním závodě není potřebná plocha k dispozici, je nutné tuto plochu definovat a postavit nebo přistavit výrobní halu. Cílem je naplánovat veškeré procesy tak, aby byl požadovaný model vyrobitelný.

2. ETAPA – Poptávkové řízení

Jelikož není v kapacitách jednotlivých automobilek vyrábět si vlastní výrobní zařízení, je nutné uzavřít smlouvu se strategickým dodavatelem výrobní technologie, který je dodavatelem kompletního zařízení nebo většinou jen jeho části.

K tomuto účelu je nutné vytvořit technické zadání. V technickém zadání jsou definovány jednotlivé premisy, jako je výrobní kapacita, výrobní takt, směnnost a procentuální vyjádření využitelnosti zařízení (tj. plánovaná doba poruchy).

Součástí technického zadání je i tzv. V-plán (výrobní plán), který detailně popisuje požadovanou výrobní technologii na úrovni jednotlivých výrobních stanic s popisem jednotlivých operací.

Po dokončení tohoto dokumentu se přes oddělení nákupu zahajuje výběrové řízení na dodavatele zařízení. Výběrové řízení má několik kol, kde nejprve je požadována nabídka.

Tato etapa končí seznamem nabídek od všech potenciálních dodavatelů.



3. ETAPA – Výběr dodavatelů

Po obdržení nabídek jsou odborným útvarem technicky vyhodnoceny. Řeší se funkčnost nabídnutého zařízení a po schválení je nabídka technicky uvolněna k cenovému projednání.

V této etapě je detailně řešen layout zařízení a funkčnost nabízeného zařízení. V případě nabídek pro ŠKODA AUTO a.s. se nabídnutá cena zařízení porovnává s ostatním výrobním zařízením v rámci celého koncernu Volkswagen.

Cílem této etapy je objednávka na konstrukci, výrobu přípravků a zařízení, výstavba a zprovoznění výrobní linky pro svařování karoserie.

4. ETAPA – Konstrukce a výstavba zařízení

Po objednání pracuje dodavatel na konstrukci jednotlivých přípravků a chapačů. Vstupem mu jsou konstrukční data jednotlivých výlisků, svařenců a spojovacích elementů.

Během konstruování a rozmístění výrobního zařízení ve 3D layoutu je zařízení prověřeno simulací. Po odsouhlasení konstrukce a layoutu zodpovědným projektantem za daný úsek, je technologie uvolněna do výroby. Současně je objednána i další technologie, jako jsou průmyslové roboty, svařovací technologie, dopravníky, elektrické komponenty a další.

Zařízení je následně dodáno přímo do výrobní haly, kde je dle layoutu rozmístěno a ukotveno. Po kompletním elektrickém propojení a připojení médií (chladicí voda, stlačený vzduch, technologické plyny atd.) se výrobní technologie zprovozní. Během výroby jednotlivých svařenců se zohledňuje jejich kvalita (pevnost spojů a stabilita rozměrů) a jsou přijata opatření k dosažení výrobního taktu.

5. ETAPA – Přejímka zařízení

Během zprovoznování výrobního zařízení je zavedena přejímací komise. Komise je složena ze zástupců úseků výroby, údržby, kvality, plánování a dodavatele. Je zpracován seznam závad, které je nutno k přejímce zařízení do užívání odstranit.

Pokud zařízení vyrábí kvalitní svařence, je dosažena předepsaná doba taktu, je ověřena způsobilost a výkonost procesu a jsou odstraněny všechny závady bránící převzetí a zařízení je předáno do užívání.

Nyní je zahájena sériová výroba, tzv. SOP (Start of Production).

Jak celý proces probíhá v čase, ukazuje následující Obrázek 24:



Obrázek 24 - Plán vzniku výrobku

Projekty ve ŠKODA AUTO a.s. jsou řízeny na základě tzv. PEP -48 (PEP – Produkt Entwicklungsplan, plán vzniku výrobku). Délka projektu od schválení až po start sériové výroby je 48 měsíců. První konstrukční data karosérie jsou k dispozici 22 měsíců před SOP. 8 měsíců před SOP je výrobní zařízení zprovozněno a jsou vyrobeny první svařence. Tento milník se nazývá VFF (VFF – Vorserien Freigabe Fahrzeuge, start předsériové výroby).

4.4. Definice ukazatelů

V této kapitole budou popsány základní ukazatele, které je třeba zohlednit a vyhodnotit při projektování výrobního systému svařovny.

4.4.1. Spojovací ekvivalent

Spojovací ekvivalent (S_{pEq}) je přepočítaný počet vybrané spojovací technologie na jeden odporový bodový svar, viz. Tabulka 4.



Tabulka 4 – Tabulka pro přepoččet vybrané spojovací technologie na 1 spojovací ekvivalent

Spojovací technologie	1 $S_p E_q$
Odporové bodové svařování	1 OSB
MIG pájení	7 mm
MAG svařování	14,7 mm
Přivařování svorníků	1,5 ks
Lepení	71 mm
Svařování laserem	13 mm
Pájení laserem	14 mm

Když se takto přepočítají spoje na karosérii Škoda Rapid, výsledkem je následující tabulka:

Tabulka 5 - Spojovací ekvivalenty na karosérii Škoda Rapid

Spojovací technologie	Počet nebo délka spojů	1 $S_p E_q$
Odporové bodové svařování	4264 ks	4264
MIG pájení	1005 mm	143
MAG svařování	3210 mm	218
Přivařování svorníků	311 ks	207
Pájení laserem	6005 mm	428
Lepení	78347 mm	1103
CELKEM		6363

Takto se dají vůči sobě porovnávat různé typy karosérií, i pokud mají použity různé druhy spojovacích technologií.

Velmi důležité je to, že se takto dá zjistit, jak vysoké jsou investice na jeden $S_p E_q$. Pokud celkovou investici výrobního zařízení podělíme počtem $S_p E_q$,



Na Obrázku 25 je příklad hloubky výroby karosérie Škoda Rapid. Šedě jsou označeny svařence vyráběné v závodě ŠKODA AUTO a.s. a červeně jsou označeny svařence, které se nakupují. Tyto svařence se vyrábějí mimo závod ŠKODA AUTO a.s.

Definování hloubky výroby pro daný výrobní závod je dán velikostí výrobní plochy, která je v daném místě k dispozici.

Pro svařovnu na výrobu karosérie Škoda Rapid byla definována $HV = 74\%$.

4.4.3. Stupeň automatizace

Stupeň automatizace A° je podíl automatizovaných činností vůči manuálním činnostem, viz. rovnice (4.3).

$$A^\circ [\%] = \frac{\sum \text{automatických pracovišť}}{\sum \text{manuální práce} + \sum \text{automatických pracovišť}} \cdot 100 \quad (4.3)$$

Dnešní svařovny ve ŠKODA AUTO a.s. mají stupeň automatizace v rozmezí $A^\circ = 62$ až 85% , v případě Škody Rapid je $A^\circ = 82\%$.

Při návrhu výrobního systému je stanovení, zda bude výroba ruční nebo robotická, zásadní pro další projektování výrobního zařízení. Rohodnutí o robotizaci výroby nelze provádět po celou dobu projektování svařovacího zařízení.

Pojmem ruční nebo robotické svařování se rozumí způsob uchycení (uchopení) a vedení výrobní technologie. Pro ruční svařování to znamená svařování s obsluhou svářečského operátora, pro robotické průmyslovým robotem nebo svařovacím automatem. Způsob posuvu přídavného materiálu, dopravy jednotlivých matic a čepů a všeobecně všech pohybů uvnitř celku dané svařovací technologie není v tomto dělení zohledněno.

Faktorů ovlivňujících rozhodnutí o daném způsobu výroby je několik.

Jedním kritériem může být tvarová složitost výrobku ve spojení s výsledkem toleranční analýzy jednotlivých dílů na horní mezi tolerančního pole. Tímto je dán



předpoklad, že slícování dílů v místě svaru nebude minimální a v rámci dávky nebude konstantní. Na takovéto kolísání svarové mezery (svarové plochy) dokáže automatický provoz jen stěží reagovat. V tomto případě je vhodnější návrh ruční výroby.

Dalším faktorem je místo svaru a k tomu nutné technologické zařízení. Pokud se má svařovat ve vzdálenosti 1m a více je takováto ergonomie nevyhovující a i velikost a hmotnost svařovacího zařízení je vysoká. Proto je v tomto případě vhodnější výrobu robotizovat.

Dalším kritériem je celkový počet svarů a možné varianty výroby. Pokud obojí stoupá, zvyšuje se požadavek na paměť svářečího operátora a rizikovitost zmetkovitosti je na maximální úrovni.

Podstatná je také oblast, ve které se má svařovací zařízení zprovoznit. Ve vyspělých zemích je manuální práce nákladná oproti ceně svářečího operátora např. v Indii.

Volba svařovací technologie hraje významnou roli při robotizaci svařování. Jsou technologie, které jsou vhodnější pro ruční svařování a naopak jsou technologie, které je nutné robotizovat. Tabulka 6 znázorňuje přehled svařovacích technologií a jejich zařazení tak, jak je to obvyklé v automobilovém průmyslu.

Tabulka 6 - Faktor svařovací technologie na možnost automatizace

Ruční svařování	Robotické svařování
MAG svařování	Laserové svařování Laserové pájení Výstupkové svařování
MIG pájení Odporové bodové svařování Přivařování svorníků	



Nyní bude problematika volby způsobu metody svařování probrána podrobněji z ekonomického hlediska.

Budou zavedeny tyto veličiny:

Tabulka 7 - Definice veličin pro výpočet doby návratnosti

IR [ks]	robot
C_r [€]	investice za robota
I_r [€]	instalace robota
A_c [kWh/rok]	průměrná roční spotřeba el. energie
C_w [€/kWh]	cena elektrické energie
M [ks]	pracovník
C_M [€/rok]	roční náklady za pracovníka

Vztah mezi náklady za robota a pracovníka:

$$IR (C_r + I_r + (A_c \cdot C_w)) \leq M \cdot C_M \quad (4.4)$$

po úpravě

$$1 \leq \frac{M}{IR} \cdot \frac{C_M}{C_r + I_r + (A_c \cdot C_w)} \quad (4.5)$$

Nyní bude definováno x [roků] jako období provozu výrobního zařízení. Potom:

$$IR (C_r + I_r + x \cdot (A_c \cdot C_w)) \leq M \cdot x \cdot C_M \quad (4.6)$$

po úpravě

$$x \geq \frac{C_r + I_r}{\frac{M}{IR} \cdot C_M - (A_c \cdot C_w)} \quad (4.7)$$



Rovnice (4.7) definuje dobu návratnosti navržené mechanizace.

V praxi se velmi často vyskytují kombinovaná výrobní zařízení, jak výrobní personál, tak i průmyslové roboty:

Tabulka 8 - Definice veličiny „pracovník“

M_a [ks]	pracovník pro automatickou výrobu
M_m [ks]	pracovník pro manuální výrobu

$$IR \cdot (C_r + I_r + (A_C \cdot C_W)) + M_a \cdot C_M \leq M_m \cdot C_M \quad (4.8)$$

po úpravě

$$1 \leq \frac{(M_m - M_a)}{IR} \cdot \frac{C_M}{C_r + I_r + (A_C \cdot C_W)} \quad (4.9)$$

V případě platnosti rovnice (4.9) lze prohlásit podmínky pro automatizaci za splněné.

A dále:

$$IR \cdot (C_r + I_r + x \cdot (A_C \cdot C_W)) + M_a \cdot x \cdot C_M \leq M_m \cdot C_M \quad (4.10)$$

po úpravě

$$x \geq \frac{(C_r + I_r)}{\frac{(M_m - M_a)}{IR} \cdot C_M - (A_C \cdot C_W)} \quad (4.11)$$

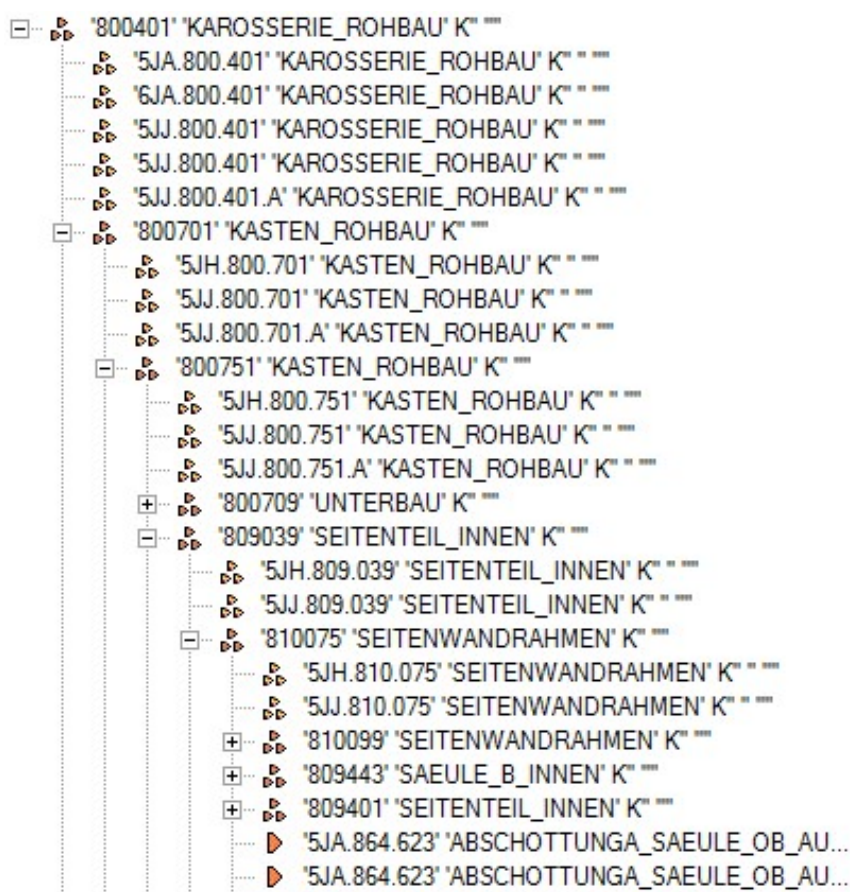
Každá firma si ve svých cílech stanoví maximální dobu návratnosti svých investic. Rovnicí (4.11) lze spočítat, zda je přechod z ryze ruční výroby na výrobu robotickou (nebo kombinovanou) ekonomicky výhodný.

4.5. Projektování pomocí nástrojů digitální továrny

ŠKODA AUTO a.s. používá pro plánování výrobního systému v oblasti svařoven systém digitální továrny s názvem Process Designer. Tento databázový 3D plánovací systém je vyvinut společností Siemens.

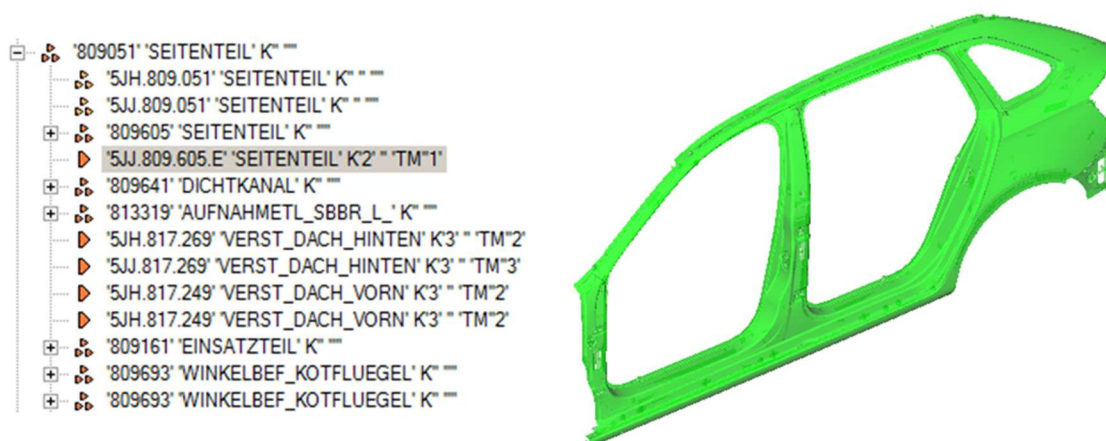
4.5.1. Produkt

Vstupními daty pro projektování jsou konstrukční data karosérie. Data jsou na jedné straně definována konstrukčním kusovníkem, kde je ke každé pozici přiřazen 3D reprezentant v podobě modelu.

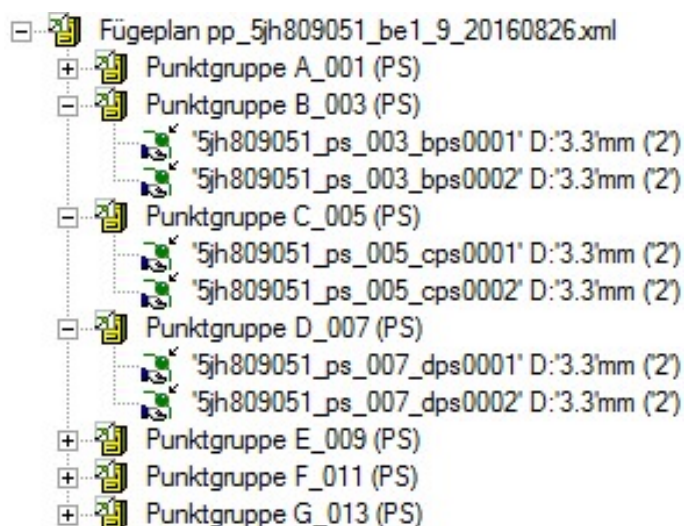


Obrázek 26 – Přehled části kusovníku karosérie Škoda Rapid

Jednotlivým uzlům, svařencům, jsou přiřazeny tabulky se spojovacími elementy. Tabulky obsahují název spoje, umístění v prostoru (x, y, z), vektorovou orientaci, atributy spojovaných výlisků a v případě kontinuálních spojů i jejich 3D model (pro tavné svary, pájené spoje, lepené spoje atd.).



Obrázek 27 - 3D model postranice Škoda Rapid přiřazený k pozici v kusovníku



Obrázek 28 - Spojovací elementy pro vnější postranici Škoda Rapid

Nyní je kompletně definován produkt v prostředí digitální továrny, pro který je třeba navrhnout výrobní systém svařovny.

4.5.2. Provozní prostředky

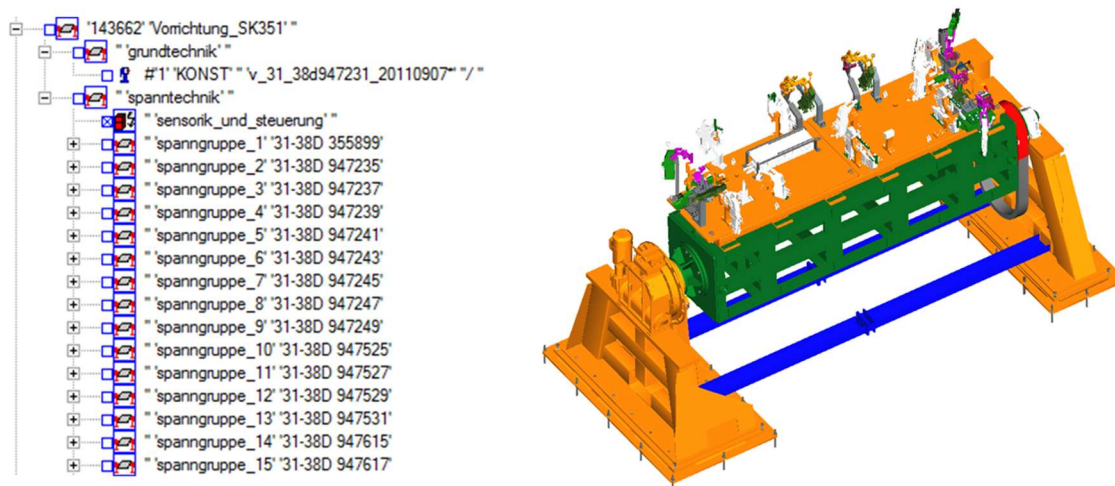
Jednotlivé výrobní prvky, z kterých se skládá kompletní výrobní zařízení, lze nazvat provozními prostředky.

Patří mezi ně:

- Přípravky a chapače
- Průmyslové roboty a pojezdové osy
- Svařovací zařízení

- Dopravníky
- Bezpečnostní prvky
- Logistické palety a přepravky
- Oplocení
- Elektrická instalace
- Rozvody médií
- Kladky pro vyjímání zařízení při opravě

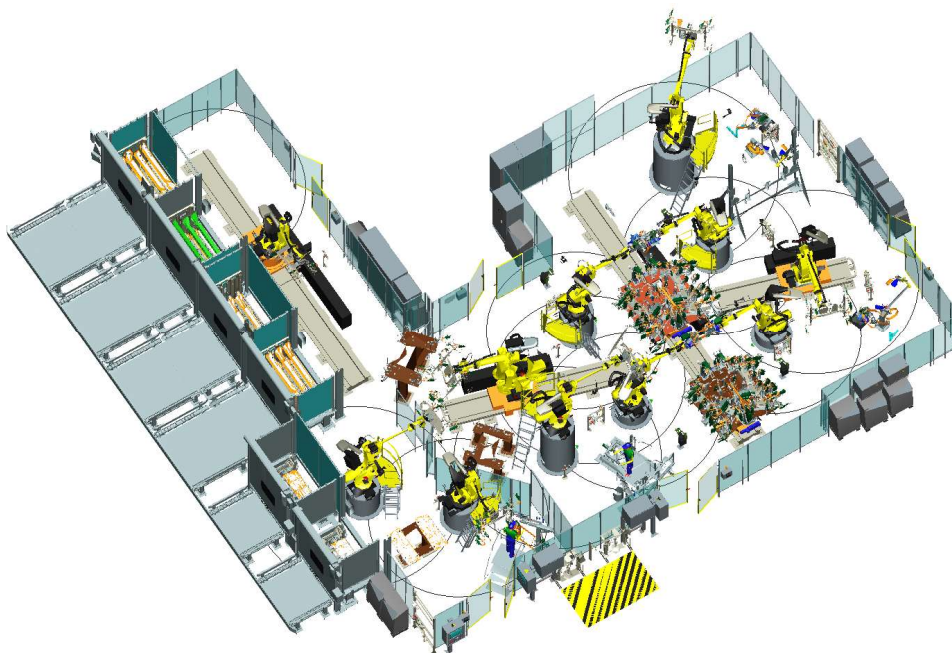
Provozní prostředek je nutno nejprve založit. K tomu slouží tzv. projektová knihovna. K elementu zavedeném v knihovně je definován název, číslo, skupina a typ. Model je vytvořen v konstrukčním systému Catia a pro využití v Process Designeru je převeden do formátu *.jt.



Obrázek 29 - Přípravek pro svařování vnější postranice Škoda Rapid

Jednotlivé výrobní zařízení se skládá do stromové struktury, kde nejvyšším uzlem je daný výrobní úsek, poduzlem je úroveň řízení PLC a dalším hlavním poduzlem je stanice.

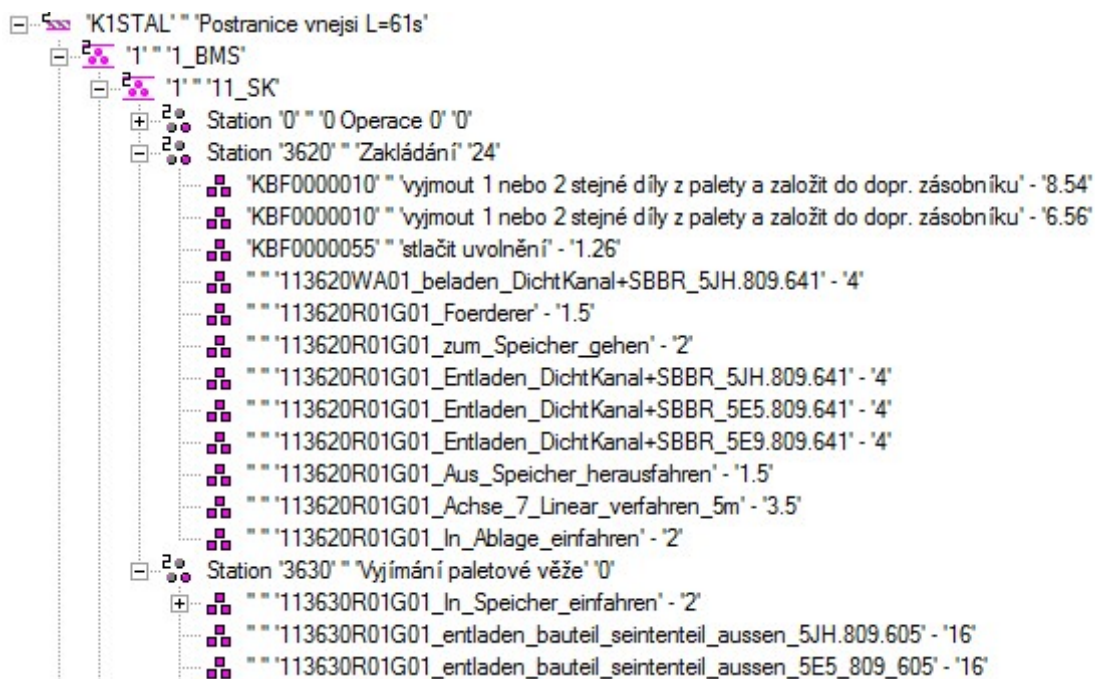
Zařízení je vůči sobě uspořádáno v rámci prostoru a je vytvářen 3D layout výrobního zařízení. Tímto se získává grafické znázornění jednotlivých modelů ve výrobní celek.



Obrázek 30 - 3D layout linky přední podlahy karosérie Škoda Rapid

4.5.3. Operační struktura

Popis jednotlivých činností, které je třeba vykonat, se nazývá operace. Suma všech operací je pak technologickým postupem. Zápis technologického postupu do stromové struktury nazýváme operační strukturou, viz. Obrázek 31.



Obrázek 31 - Operační struktura Škoda Rapid



V prostředí DF lze s oblibou použít knihovnu operací. Knihovna obsahuje nejužívanější činnosti při výrobě karosérie. Mezi tyto patří:

- Manipulace s výlisky
- Svařovací operace
- Transport svařenců
- Pohyby robotů a pracovníků
- Montážní operace panelových dílů
- Nanášení lepidel
- Lemování
- atd.

Jednotlivé operace v knihovně jsou složené z operačních kroků. Ke každému operačnímu kroku je přiřazen čas trvání dané činnosti. Tyto kroky je možné parametrizovat a tvořit tím univerzální operace. Parametrem může být:

- Délka cesty od přepravky s výliskem k základacímu přípravku
- Počet svařovacích odporových bodů
- Délka svaru
- Délka naneseného lepidla

Čas - výpočet

Označení: vymout 1 díl z palety a založit do přípravku

Kód:

Celkový čas: 5.04 s ☐ S přírážkou

Faktor: 1 1

Předvolený čas: 0.00 s

Vypočítaný čas: 5.04 s

Definice parametru

Poz.	Parametr	Popis	Poznámka	Hodnota	Jednotky
1	W1	cesta k paletě		0.00	M
2	G	Hmotnost dílu		1.60	KG
3	S	objemnost	Prázdné; nerozměrné; zaškrtnuté; rozměrné	<input checked="" type="checkbox"/>	BOOL
4	A	obtížné uchopení (platí pouze prázdné; jednoduché uchopení; zaškrtnuté; obtížné ucho		<input type="checkbox"/>	BOOL
5	E	rozsah vzdálenosti k uchopení	1, 2, 3	1.00	
6	P	dodatečné zakládací postupy při		1.00	
7	B	Přiměřené shrbení do palety při		0.00	
8	W2	cesta k přípravku		1.00	M
9	NAME	Naznačení úlohy			TEXT

Vom Bauteil übernehmen: ☒ weight ☐ GewichtGewogen

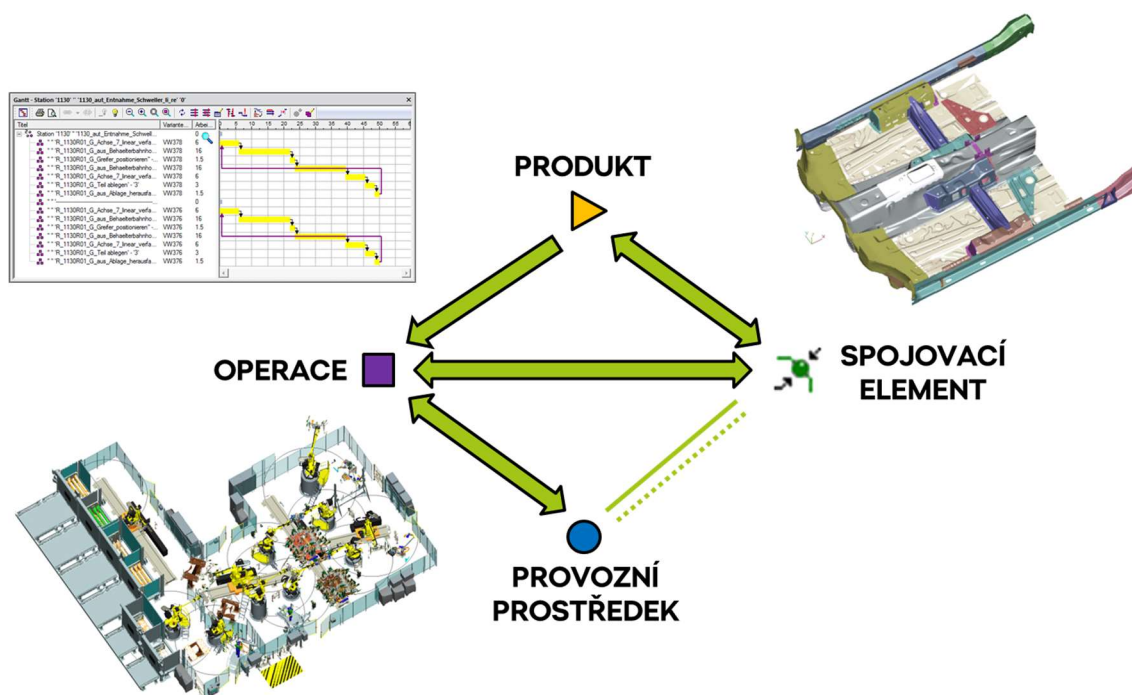
Obrázek 32 - Operace složená z parametrizovaných operačních kroků

V knihovně ručních operací jsou jednotlivé operační kroky podloženy MTM⁴ kódy. Sestavením operací do operační struktury a vyplněním parametrů kroků dostaneme výslednou MTM analýzu pracoviště. Takto vytvořená operační struktura je základem pro ergonomickou analýzu pracoviště dle metody EAWS.

V systému PD lze s operační strukturou pracovat pomocí Pert nebo Gantt diagramu.

4.5.4. Projektování svařovacího zařízení v prostředí digitální továrny

Úlohou návrhu výrobního svařovacího zařízení je nalézt takové vazby mezi produktem, výrobními zdroji a operacemi, aby výsledný statický celek zabezpečil výrobu dílčích svařenců nebo kompletní karosérie. Schéma je znázorněno na Obrázku 33.

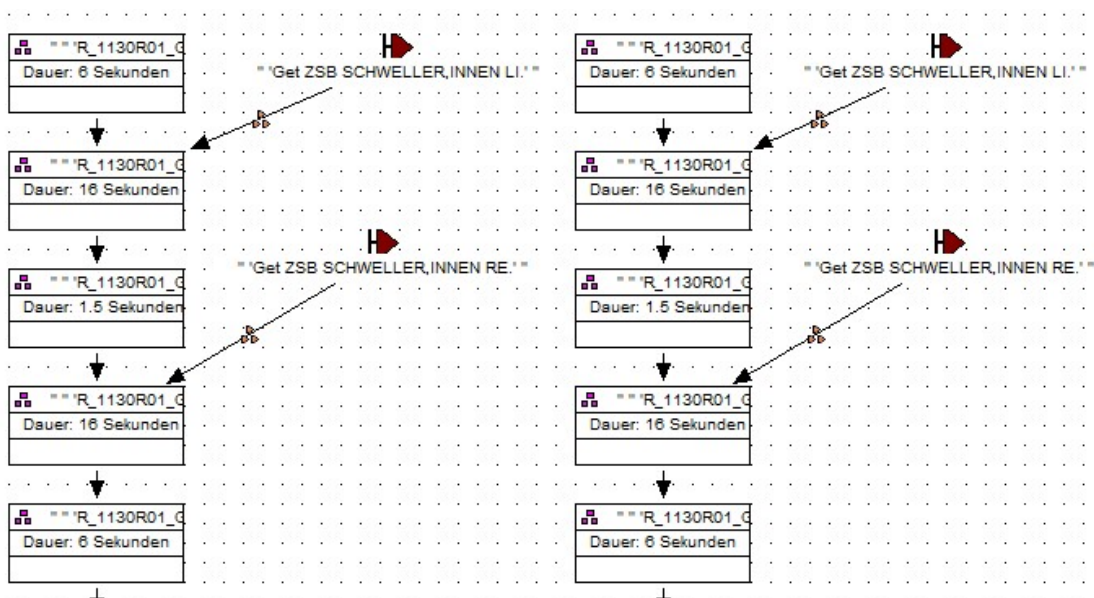


Obrázek 33 - Schéma plánování v DF

⁴ MTM (Methods Time Measurement) – postup, který analyzuje manuální činnosti nebo metody na základní pohyby a přiřazuje každému pohybu předdefinovanou časovou normu, která je závislá od druhu pohybu a podmínek, ve kterých je pohyb prováděn. Patří mezi metody měření práce prostřednictvím předem určených časů. Metoda je založená na principu, že každou manuální práci můžeme rozdělit na základní pohyby, ze kterých je možno vytvořit zpětně jakýkoliv pracovní postup.[41]

Station	Operation	Duration (min)	Activity
Station 0''	0 Operace 0' 0''	0	
''	'' Provozání op nula' - 0'	0	
Station 3620''	3620'' Zakládání' 24'	24	
''	'' KBF0000010'' Vymout 1 nebo 2 stejné díly z palety a založit do dopr. zásobníku' - 8.54'	8.54	SK371
''	'' KBF0000010'' Vymout 1 nebo 2 stejné díly z palety a založit do dopr. zásobníku' - 6.56'	6.56	SK372
''	'' KBF0000055'' Stlačit uvolnění' - 1.26'	1.26	
''	'' 113620WA01_beladen_DichtKanal+SBBR_5JH.809.641' - 4'	4	SK351
''	'' 113620R01G01_Foederer' - 1.5'	1.5	
''	'' 113620R01G01_zum_Speicher_gehen' - 2'	2	
''	'' 113620R01G01_Entladen_DichtKanal+SBBR_5JH.809.641' - 4'	4	SK351
''	'' 113620R01G01_Entladen_DichtKanal+SBBR_5E5.809.641' - 4'	4	SK371
''	'' 113620R01G01_Entladen_DichtKanal+SBBR_5E9.809.641' - 4'	4	SK372
''	'' 113620R01G01_Aus_Speicher_herausfahren' - 1.5'	1.5	
''	'' 113620R01G01_Achse_7_Linear_verfahren_5m' - 3.5'	3.5	
''	'' 113620R01G01_In_Ablage_einfahren' - 2'	2	
Station 3630''	3630'' Výmění paletové věže 0'	0	
''	'' 113630R01G01_In_Speicher_einfahren' - 2'	2	
''	'' 113630R01G01_entladen_bauteil_seintenteil_aussen_5JH.809.605' - 16'	16	SK351
''	'' 113630R01G01_entladen_bauteil_seintenteil_aussen_5E5_809_605' - 16'	16	SK371
''	'' 113630R01G01_entladen_bauteil_seintenteil_aussen_5E9_809_605' - 16'	16	SK372
''	'' 113630R01G01_Aus_Speicher_herausfahren' - 2'	2	
''	'' 113630R01G01_Achse_7_Linear_verfahren_2m' - 1.4'	1.4	SK371
''	'' 113630R01G01_Achse_7_Linear_verfahren_6m' - 4.2'	4.2	SK351
''	'' 113630R01G01_Achse_7_Linear_verfahren_10m' - 7'	7	SK372

Pertův diagram (viz. Obrázek 35) naopak zohledňuje operační strukturu v logické návaznosti s grafickým znázorněním vstupujících dílů a vystupujících svařenců. Tento diagram přehledně zobrazuje, jaké spoje se na dané operaci vyrábí a jaké jsou k tomu použité výrobní prostředky.



Ing. Petr HYNEK

V tuto chvíli je vytvořen virtuální model svařovacího výrobního zařízení, který je svázán s produktem, spojovacími elementy a jsou kompletně popsány činnosti, které vedou k výrobě karosérie. Tento model je statický.

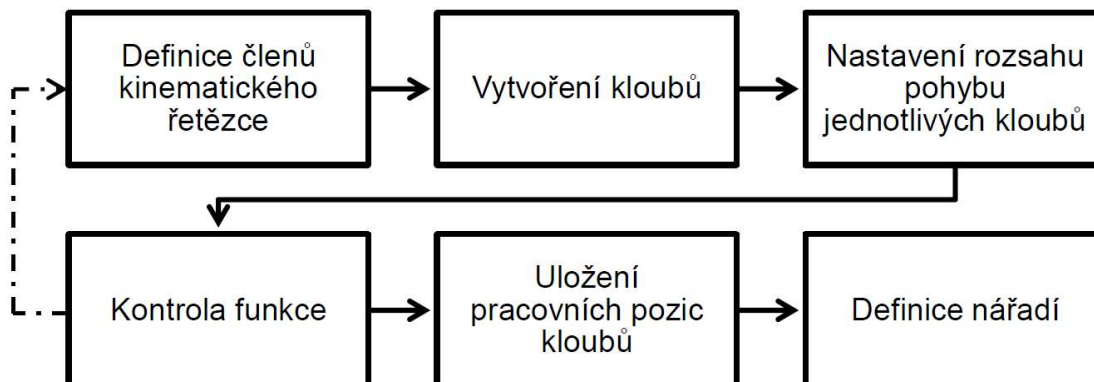
4.6. Simulace robotické výrobní linky

Nyní je statický model, popsáný výše, zpracován dále. S modelem jsou prováděny cílené simulace. Aby bylo možné simulace provádět, je nutné statický model výrobního zařízení kinematizovat. Automobilka ŠKODA AUTO a.s. pro tyto účely používá v oblasti svařovny simulační nástroj Process Simulate, také od firmy Siemens.

4.6.1. Kinematizace svařovacích odporových kleští

Definicí členů kinematického řetězce se určuje, které prvky se mají pohybovat vůči ostatním. To je provedeno vybráním jednotlivých prvků modelu (upínky, šrouby, podložky, elektrody kleští, atd.). Členy lze pro lepší orientaci pojmenovat. Kloub je vytvořen vybráním dvou členů kinematického řetězce a je znázorněn šipkou v kinematickém řetězci, směřující v pořadí členů. Pořadí výběru členů určuje jejich vzájemný vztah „rodič → potomek“. Jednotlivé klouby je možno také pojmenovat. Vytvářené vazby, ať už rotační nebo posuvné, jsou s jedním stupněm volnosti.[38]

Schéma následujícího postupu (viz. Obrázek 36) je shrnutím kinematizace a definice nářadí.








Obrázek 36 - Postup kinematizace a definice výrobního nářadí [38]

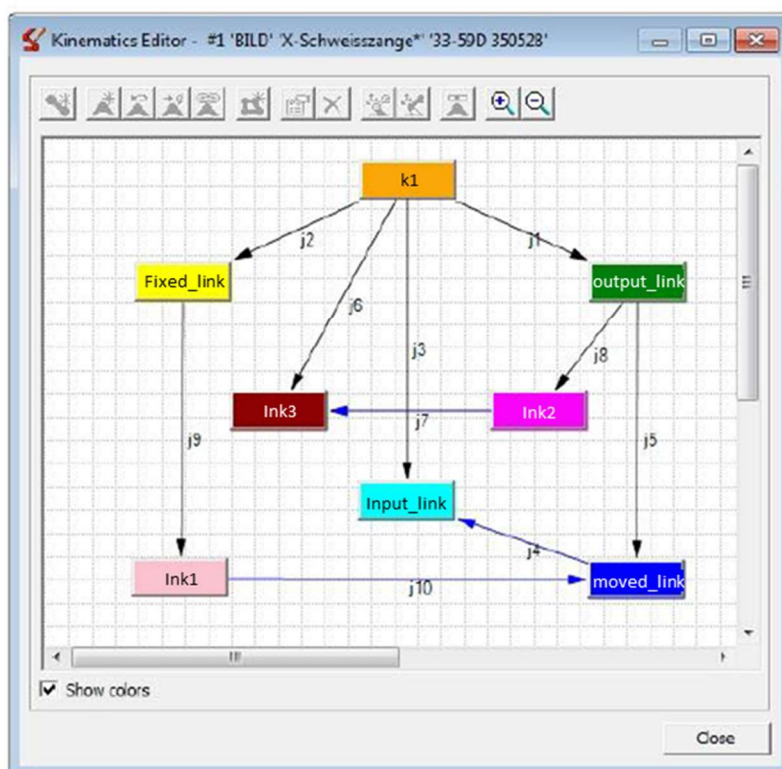
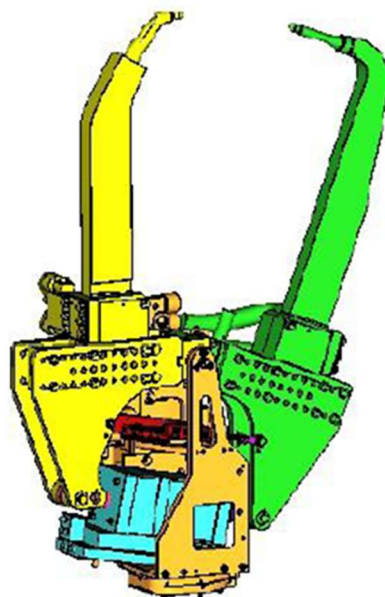


Jednotlivé vazby je možné vůči sobě spojit a lze dodefinovat podmínky. Lze tak ovládat více vazeb najednou s definovanou vzájemnou závislostí.

Tabulka 9 - Prvky kinematického řetězce

Prvek	Význam prvku
	rotační vazba
	posuvná vazba
	rotační spojená vazba
	posuvná spojená vazba
	kinematický člen

Na Obrázku 37 je model robotických odporových svařovacích kleští s kompletním kinematickým řetězcem.



Obrázek 37 - Kinematika svařovacích kleští typu X

Aby bylo možné kinematizované zařízení podrobit simulacím, je nutno definovat ještě 2 oblasti:

- Definice souřadných systémů, které určují požadovanou polohu modelů vůči sobě viz. Tabulka 10



Tabulka 10 - Souřadné systémy definované na zařízení

Souřadný systém	Význam souřadného systému	Zařízení používající souřadný systém
TCP	nastavení nástroje do požadované lokace	svařovací kleště, chapač
TCPF	při nasazení nástroje na robota převezme robot TCP nástroje za svůj TCPF	robot
ANB	pro připevnění nástroje na robota nebo na podstavec	svařovací kleště, chapač
HOME	výchozí pozice elektrod svařovacích kleští, umístěn na čepičce pevné elektrody	svařovací kleště
TOOLFRAME	pro připevnění nástroje	robot
BASEFRAME	ustavení zařízení	robot, přípravek, podstavec
FZG	pro ustavení produktu	chapač, přípravek

- Určit specifické části v modelu, které se nezohledňují při kontrole kolizí (např. při simulaci sevření kleští se svařovanými plechy se z kolizní analýzy vyjímají svařovací čepičky).

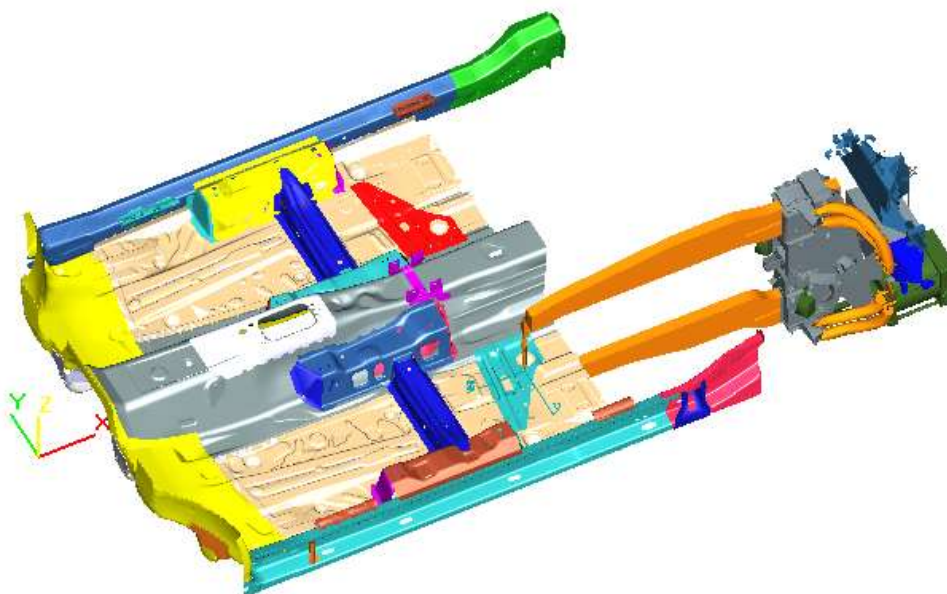
4.6.2. Simulace dostupnosti svařovacích odporových kleští

Jednou ze základních simulačních analýz prováděných na jednotlivých svařencích a karosérii je simulace dostupnosti svařovacích kleští. Analýza spočívá v tom, že na požadovanou skupinu odporových svařovacích bodů jsou postupně graficky polohovány vybrané svařovací kleště a v simulačním softwaru je hledána alespoň jedna poloha kleští, kde zkoumaný produkt není s kleštěmi v kolizi.

Průběh simulace je následující:

1. Svařovací kleště se polohují na první bodový svar z výběru
2. Kolem tohoto bodového svaru se kleště otáčejí, krok otáčení je 10° (krok otáčení 10° je defaultně v systému nastaven, lze jej však libovolně přenastavit)
3. Svařovací kleště jsou otočeny ve směru svařování o 180°

4. Nyní je opakován krok č. 2
5. Svařovací kleště se přesunou na další bodový svar ve výběru a je proveden krok č. 2 až 4
6. Po analýze všech bodů 1. kleštěmi se simulace opakuje s dalšími kleštěmi z výběru
7. Simulace končí analýzou posledních svařovacích kleští na posledním bodové svaru



Obrázek 38 – Obrázek z analýzy dostupnosti kleští

Výsledkem této simulace je matice, ve které jsou kladně označeny vyhovující kombinace svařenec – svařovací kleště a záporně kombinace v kolizi, viz. Tabulka 11.

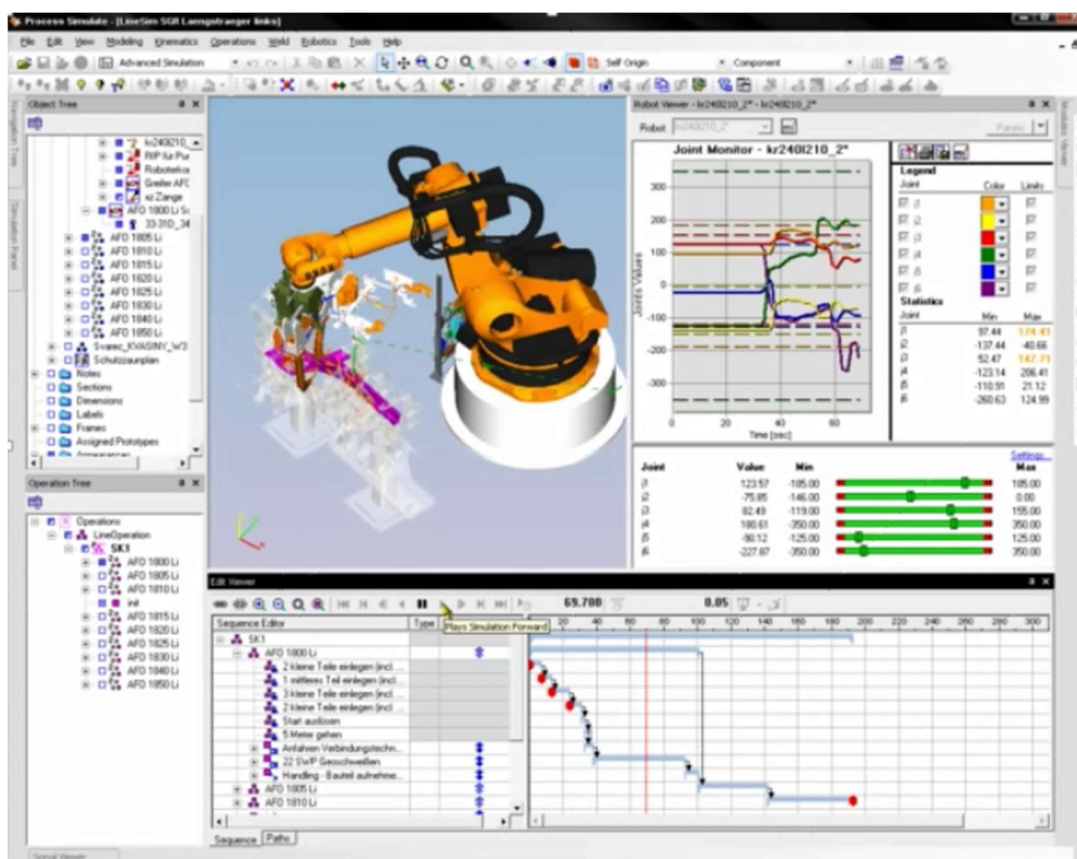
Tabulka 11 – Příklad matice dostupnosti svařovacích kleští

Zangen	Alle	5qf803203	5qf803203	5qf803203	5qf803203	5qf803203	5qf803203	5qf803203
zxs_11_59d363 -		+	+	-	+	+	+	+
zxs_11_59d363 -		+	+	-	+	+	+	+
zxs_11_59d363 -		+	+	-	+	+	+	+
zxs_11_59d363 -		+	+	-	+	+	+	+
zxs_11_59d363 -		+	+	-	+	+	+	+
zxs_11_59d363 -		+	+	-	+	+	+	+
zxs_11_59d363 -		+	+	-	+	+	+	+
zxs_11_59d363 -		+	+	-	+	+	+	+
zxs_11_59d363 -		+	+	-	+	+	+	+
zxs_11_59d363 -		+	+	-	+	+	+	+
zxs_11_59d363 -		+	+	-	+	+	-	+
zxs_11_59d363 -		+	+	-	+	+	+	+
zxs_11_59d363 -		+	+	-	+	+	+	+
zxs_11_59d363 -		+	+	-	+	+	+	+

Tato matice je základem pro další analýzu, která je předmětem řešení této disertační práce. Nyní je totiž nutné zvolit takové svařovací kleště, které jsou schopné bezkolizně svařit požadovaný svařenec a splňují další podmínky k nasazení. Tento výběr probíhá ve ŠKODA AUTO a.s. v dnešní době převážně ručně a je kompletně závislý na znalostech a zkušenostech daného projektanta svařovacího výrobního zařízení.

4.6.3. Simulace dostupnosti svařovacích odporových kleští včetně robota

Předchozí simulace zohledňovala jen model svařence a svařovacích kleští. Další etapou je simulace bodového svařování se zohledněním kinematiky průmyslového robota. Tato analýza je důležitá k určení správné polohy robota tak, aby byly dodrženy svařovací podmínky u všech bodů, vybraných ke svařování v dané stanici.



Obrázek 39 - Simulace dostupnosti se zohledněním robota

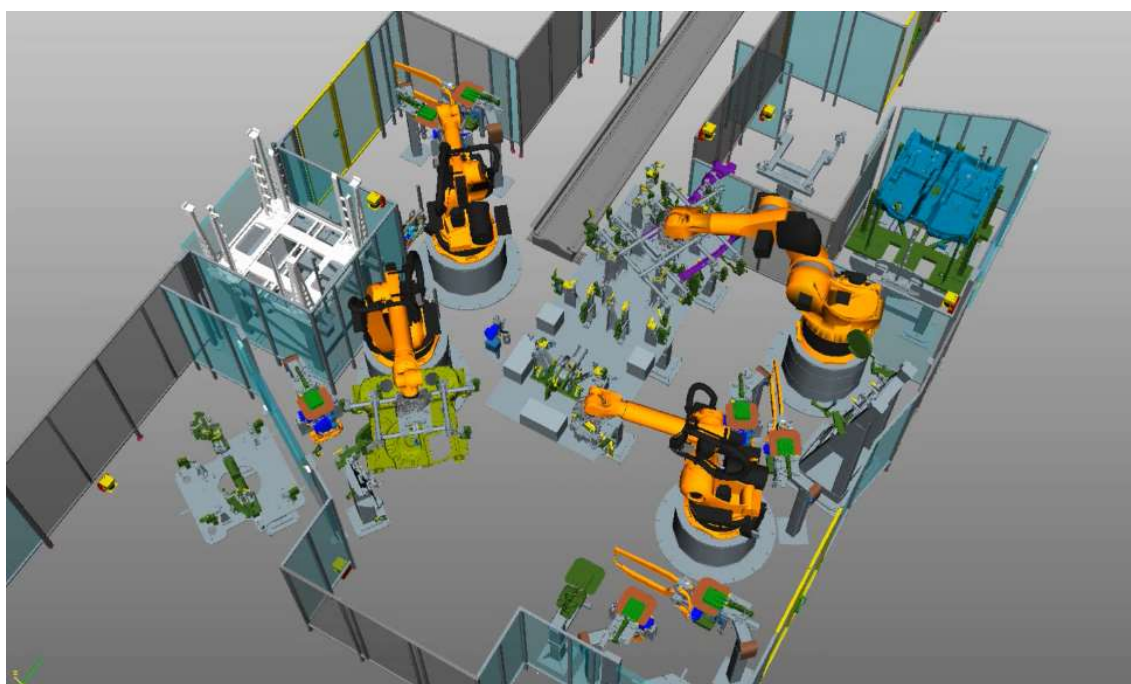
Nejprve se při této analýze kontroluje bezkoliznost jen v okamžiku sevření svařovacích odporových kleští. Přejezdové cesty z jednoho odporového bodového svaru k dalšímu nejsou v tuto fázi zohledněny.

Až poté se kontroluje bezkoliznost jak při svařování, tak i při všech pohybech robota s kleštěmi.

Kromě kolizí se při pohybu sleduje zatížení jednotlivých os robota a v případě mezních hodnot nějaké z os, je upravena dráha pohybu tak, aby zatížení bylo vyvážené. Tato simulace již ověřuje délku trvání operace a zpřesňuje plánované hodnoty.

3.1.1. Simulace robotické buňky

Po kompletní simulaci jednotlivých robotů se přechází k simulaci celé robotické buňky. Nyní se analyzují pohyby všech robotů pracujících v jedné operaci.



Obrázek 40 - Simulace robotické buňky

Takto se zjišťují pohyby a kolize mezi jednotlivými roboty. Je nutno dodat, že analýza je řízená časem a ne signálem o uvolnění a blokaci.

Po kompletním odsimulování celé robotické buňky, odstranění všech kolizí a úpravě drah robotů tak, aby byla splněna požadovaná doba taktu, se ukládají jednotlivé řídicí robotické programy na externí médium, nejčastěji na flashdisk.

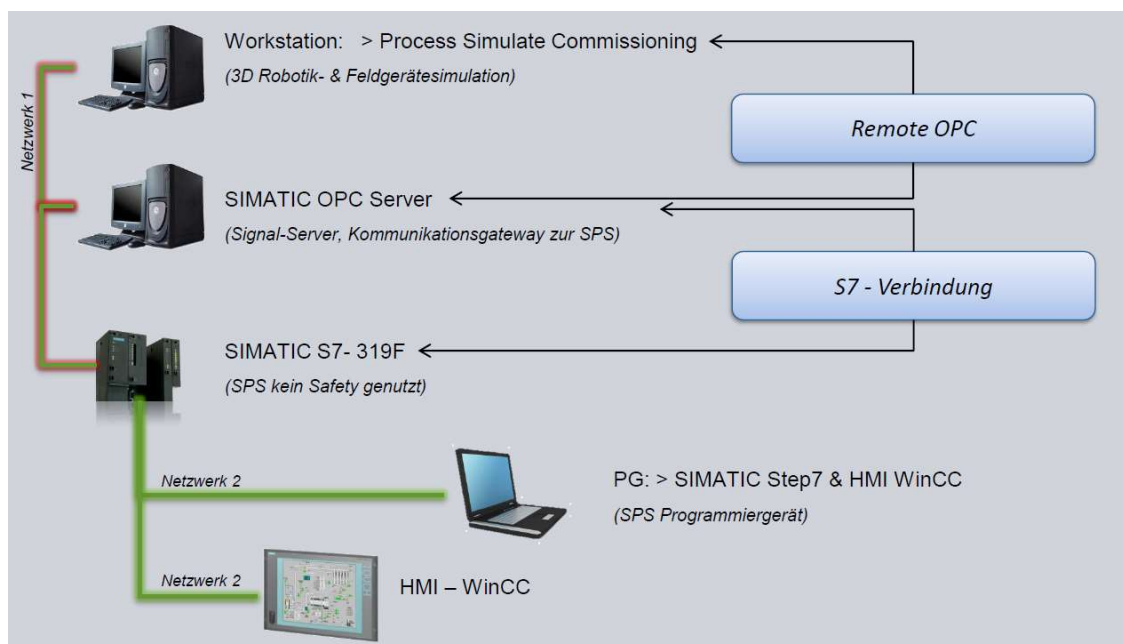
Tento krok se nazývá Off-line programování (OLP). Po uvedení robota do provozu, je možno program do fyzické řídicí skříně robota spustit a robot vykonává stejné pohyby, jako v simulaci.

4.6.4. Virtuální zprovoznění

Pokud je potřeba simulovat nejen roboty, ale chování celé výrobní stanice, je nutno definovat veškeré signály potřebné k řízení stanice. Takto se přejde k analýze řízené signály, takže do simulace je zahrnuto i řízení PLC (Programmable Logic Controller).[H3]

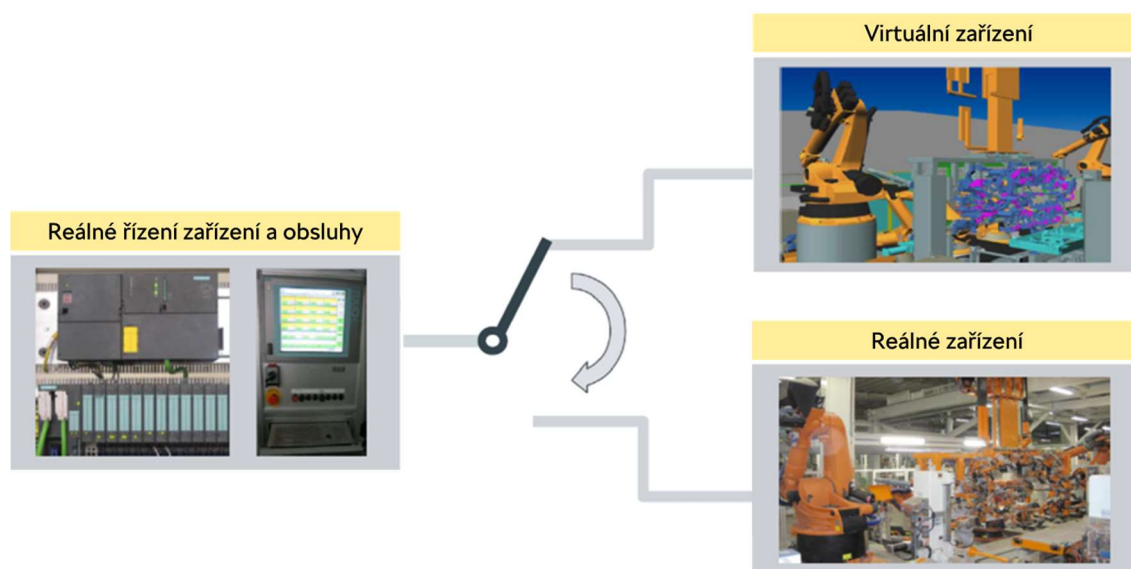
Aby se mohlo provést virtuální zprovoznění, je nutné simulační systém Process Simulate rozšířit o řídicí jednotku. To lze provést dvěma způsoby:

- K systému připojit reálné PLC
- K systému připojit simulátor PLC viz. Obrázek 41



Obrázek 41 - Zapojení zařízení pro virtuální zprovoznění pomocí simulátoru PLC [39]

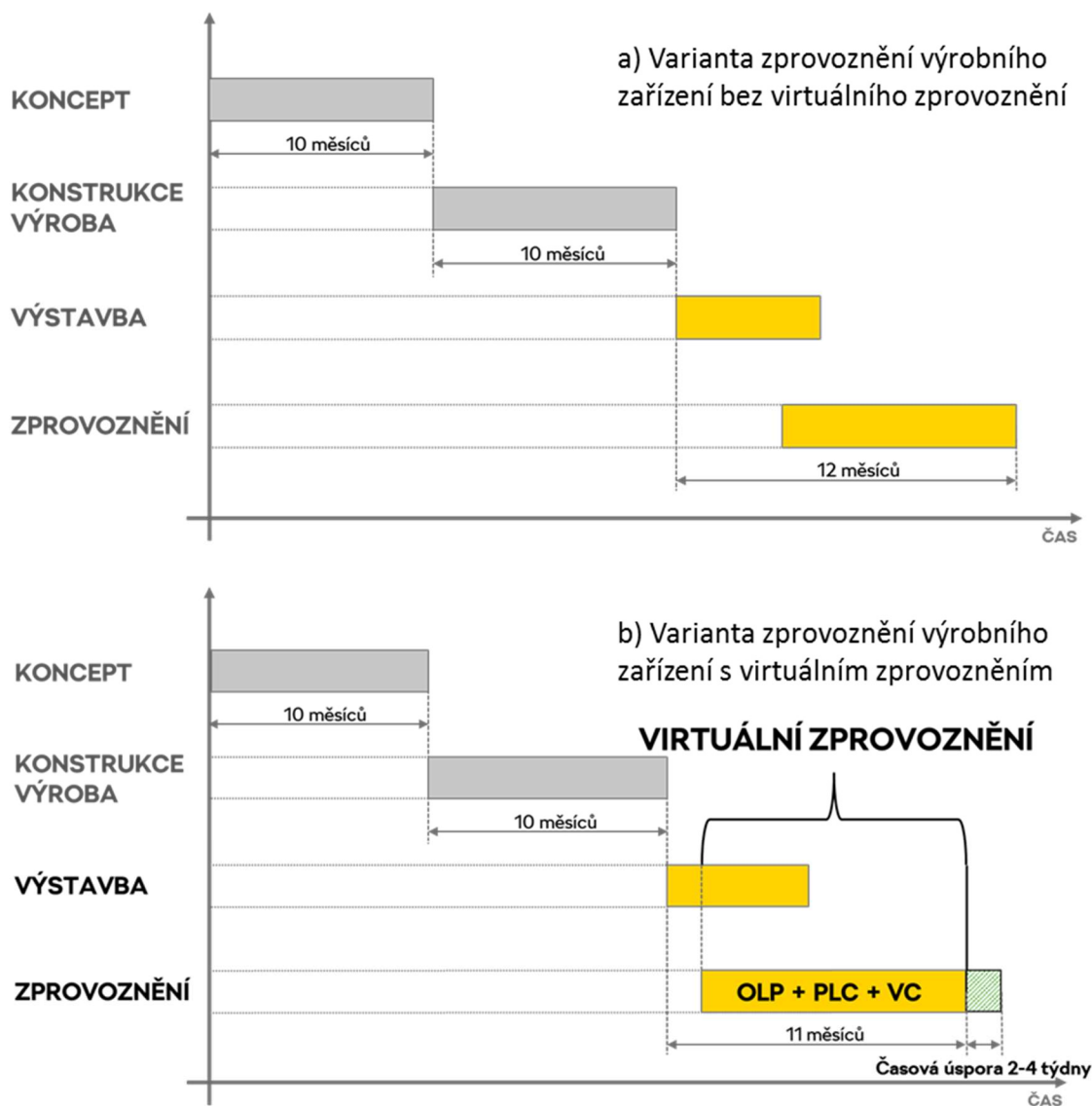
Pokud je do systému zapojeno fyzické PLC, může se nyní kontrolovat veškeré řídící signály a to za pomoci virtuálního modelu. Lze kontrolovat funkci jednotlivých senzorů, nouzových tlačítek a chování stanice po uvedení zpět do provozu, reakci bezpečnostních prvků atd.



Obrázek 42 – Schéma propojení reálného řízení zařízení s virtuálním a reálným zařízením

Jelikož lze pro kompletní programování, simulaci a kontrolu PLC použít digitální model stanice, děje se tato činnost v době, kdy ještě není fyzické zařízení instalováno ani zprovozněno. V této fázi je již možno školit obsluhu zařízení a prověřovat chování obsluhy při různých stavech výrobní linky.

Po zprovoznění reálného zařízení ve stanici, je zapojeno předem naprogramované a zkontrolované PLC do této linky. Teoreticky je zařízení možno ihned spustit a vyrábět. Jelikož jsou ale reálné podmínky o něco odlišné od těch digitálních, zařízení se zprovožňuje postupně s odstraňováním dodatečných bezpečnostních bloků.



Obrázek 43 - Časová úspora s využitím virtuálního zprovoznění

Pomocí virtuálního zprovoznění lze docílit časovou úsporu při zprovozňování výrobního zařízení. Ve ŠKODA AUTO a.s. se zatím potvrdila úspora mezi 2 až 4 týdny.[H6]



5. Optimalizace výběru svařovacích odporových kleští

V této kapitole bude provedena praktická aplikace, kdy nejprve bude provedena simulace dostupnosti svařovacích odporových kleští na svařenci „přední podlaha“ modelu Škoda Rapid. Počet zkoumaných odporových bodových svarů bude 15 a počet prověřovaných svařovacích odporových kleští bude 20. Výsledkem této simulace bude matice dostupností.

Pro tuto matici bude dále hledáno optimální řešení kombinací svařovacích odporových kleští ve dvou variantách:

- min. cena svařovacích kleští
- kombinace min. ceny a min. hmotnosti.

Pro stanovení optimálního řešení bude použit globální evoluční algoritmus.

5.1. Simulace dostupnosti na praktickém příkladu

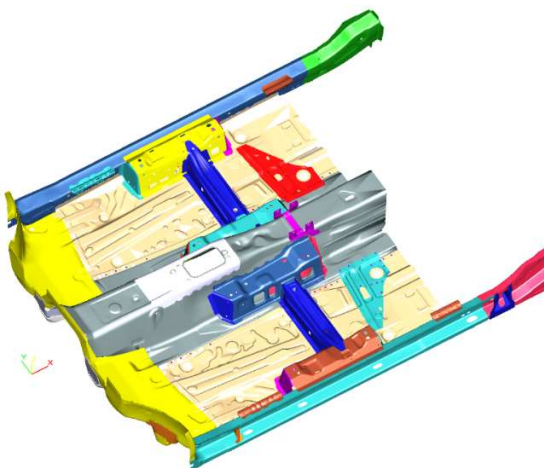
Produkt je definován kusovníkem, kde je ke každému výlisku doplněn 3D model s jednoznačným umístěním v prostoru (x, y, z). Kusovník je seznam všech vstupujících dílů (výlisků, svařenců atd.) s názvem a číslem dílu. Pro tento příklad je použit kusovník svařence „přední podlaha“ modelu Škoda Rapid viz. Obrázek 44. Jednotlivým dílům je přiřazena úroveň, která definuje okamžik, kdy díl vstupuje do karosérie (svařence).

BODEN_VORN	803203
BODEN_VORN 7Y	6RA.803.203.A
BODEN_VORN	802303
BODEN_VORN 8Y	6RA.802.303.A
BODEN_VORN 8	6RA.803.205.A
GEHAENGEAUFN_VORN 8	6RU.802.173
EPOXIDHARZKLEBER_8	AMV.167.W10
EPOXIDKLEBSTOFF 8	AMV.167.S30
EPOXIDKLEBSTOFF 8	AMV.167.S30
SCHWELLER_INNEN	802255
SCHWELLER_INNEN 9Y	6RA.802.255
SCHWELLERINNEN 9	6RA.803.755
MONTAGET_SCHWELLER 9	6RA.802.307
BLECHMUTTER7/16_20UNF_2B_B 9	N.989.228.02
SITZQUERTRAEGER	803231
SITZQUERTRAEGER 9Y	6RA.803.231
SITZQUERTRAEGER 9	6RA.803.233
AUFNAHME_SITZBEF_SCHWELLER	802569
AUFNAHME_SITZBEF_SCHWELLER 10Y	6RA.802.569
AUFNAHME_SITZBEF_SCHWELLER 10	6RA.802.581
MUTTERHALTER 10	1K0.803.941.A

Obrázek 44 – Kusovník „přední podlahy“ Škoda Rapid



Model svařence (viz. Obrázek 45) je konstruován pomocí CAD systému, v tomto případě se jedná o systém Catia.



Obrázek 45 – Model svařence „přední podlahy“ Škoda Rapid

Svařovací elementy jsou jednotlivé druhy spojů, jako např. odporové bodové svary, tavné svary, lepené spoje, atd. Elementy jsou konstruovány taktéž v systému CAD. Obsahují následující atributy (viz. Tabulka 12):

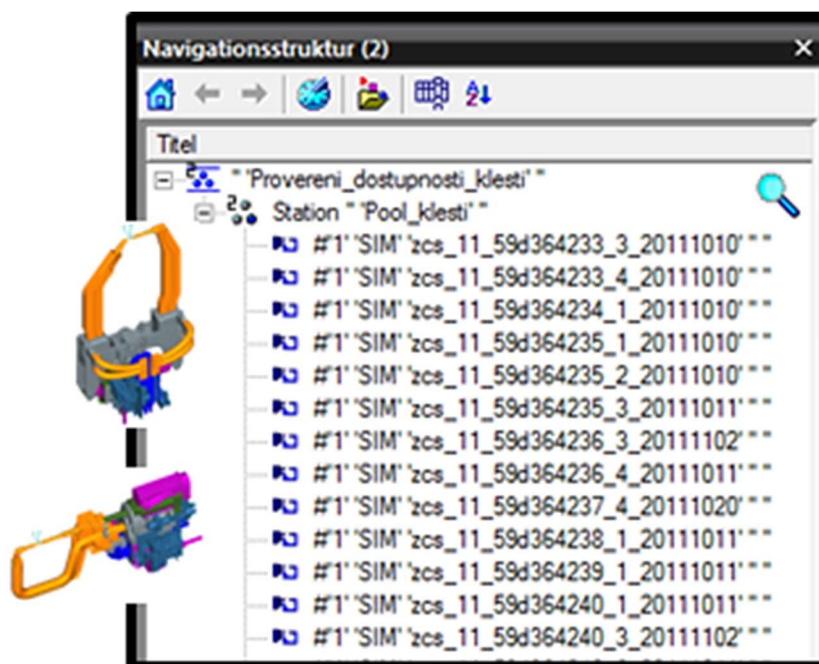
- název – „name“
- poloha – „x, y, z“
- typ svaru (OBS) – „type“
- kombinaci spojovaných dílů (2 plechové, 3 plechové) – „assigned parts“

Tabulka 12 - Svařovací elementy "přední podlahy" Škoda Rapid

name	x	y	z	type	assigned parts
WP1	167,7	-134,9	145,6	WeldPoint	2
WP2	172,1	-134,2	116,7	WeldPoint	2
WP3	197,2	-134,6	90,3	WeldPoint	2
WP4	223,8	-135,6	78,2	WeldPoint	2
WP5	248,3	-135,6	64,3	WeldPoint	2
WP6	273,5	-135,4	47,1	WeldPoint	2
WP7	300,1	-135,3	30,7	WeldPoint	2
WP8	357,1	-135,2	1,3	WeldPoint	2
WP9	386,6	-135,6	1,4	WeldPoint	2
WP10	166,4	156,6	155,4	WeldPoint	2
WP11	170,1	153,8	126,3	WeldPoint	2
WP12	184,4	157,2	107,2	WeldPoint	2
WP13	217,5	157,6	85,2	WeldPoint	2
WP14	243,9	158,3	67	WeldPoint	2
WP15	267,3	164,2	51,2	WeldPoint	2
WP16	290,2	186,5	36,9	WeldPoint	2
WP17	313,5	170,5	22,8	WeldPoint	2
WP18	352,2	172,5	1,4	WeldPoint	2
WP19	387,5	170,2	1,5	WeldPoint	2
WP20	490,5	-136,1	-22,6	WeldPoint	2

WPx (z Tabulky 12) značí název odporového bodového svaru (weld point).

Pro simulaci vyrobitelnosti svařence je nutné do systému DF (digitální továrny) připravit knihovnu výrobních prostředků. V našem případě to je knihovna standardních svařovacích kleští.



Obrázek 46 - Knihovna svařovacích kleští

Nyní jsou připraveny všechny potřebné podklady k provedení prvního výběru výrobních prostředků a to správných svařovacích kleští. Postup se nazývá simulace dostupnosti svařovacích kleští a je popsán v kapitole 3.6.2. Simulace dostupnosti svařovacích odporových kleští.

Výsledkem simulace dostupnosti svařovacích kleští je matice, kde je pro množinu svařovacích bodů (v tomto případě je prozkoumávána množina 15 odporových bodových svarů) a svařovacích kleští (v tomto případě je zkoumána dostupnost 20 svařovacích kleští) informace o bezkolizní možnosti svařování nebo jestli jsou svařovací kleště v kolizi se svařencem. Následující tabulka (viz. Tabulka 13) je výsledkem této simulace, kde je znaménkem „+“ značena vhodná kombinace kleště - bod a znaménkem „-“ je kombinace vyloučena.



Tabulka 13 - Výsledek simulace

	WP1	WP2	WP3	WP4	WP5	WP6	WP7	WP8	WP9	WP10	WP11	WP12	WP13	WP14	WP15
G1	-	+	+	+	-	+	-	+	-	-	+	-	+	+	+
G2	+	-	-	+	+	+	-	+	+	-	+	+	+	-	-
G3	-	-	+	+	-	+	+	+	+	-	-	+	+	+	+
G4	-	-	-	-	-	-	+	-	+	-	+	-	-	-	+
G5	+	+	+	-	+	-	-	+	+	-	+	-	-	-	-
G6	+	-	-	-	+	+	+	-	+	-	-	+	-	+	+
G7	-	-	-	-	-	+	-	+	-	+	+	+	-	-	-
G8	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	+	-	+
G9	+	-	+	-	-	+	-	-	-	+	-	+	-	-	-
G10	-	-	+	-	-	+	-	-	+	-	-	+	-	-	+
G11	+	+	+	+	-	+	-	+	-	+	+	+	-	-	-
G12	+	+	+	+	+	+	-	-	-	+	+	-	-	-	+
G13	-	+	-	-	-	-	+	-	+	-	-	+	+	+	-
G14	+	+	+	-	+	-	+	-	-	+	+	-	+	-	+
G15	+	+	-	-	-	+	+	-	+	-	+	-	+	+	+
G16	-	+	-	-	-	+	-	+	-	-	+	-	-	+	-
G17	-	-	-	-	-	+	-	+	+	-	-	-	-	+	-
G18	-	-	-	-	+	-	-	+	-	-	-	-	-	-	+
G19	-	-	+	-	+	-	-	-	+	+	+	+	-	+	+
G20	+	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	+	-	-

Gx (z Tabulky 13) označuje typ svařovacích odporových kleští (welding gun).

5.2. Vyjádření optimalizační úlohy

Pomocí simulace bylo zjištěno, kterými svařovacími kleštěmi je možno svařit dané svařovací body. Optimálním výsledkem je, když jeden typ svařovacích kleští dokáže svařit všechny body. Může také dojít ke stavu, že odporový bodový svar není svařitelný žádnými kleštěmi z knihovny. V takovém případě je přikročeno ke konstrukci speciálních svařovacích kleští, které dokáží tento bod svařit. Většinou se simulací potvrdí svařitelnost všech odporových bodových svarů kombinací několika kleští. Tímto vzniká množina n řešení, kdy existuje n kombinací kleští, které dokáží množinu odporových bodových svarů svařit.

Matematický zápis této úlohy je dán vztahem (5.1):

$$M_{dk} = OSB \cdot SK \quad (5.1)$$

kde:

OSB – množina zkoumaných odporových bodových svarů

SK – množina prověřovaných svařovacích kleští

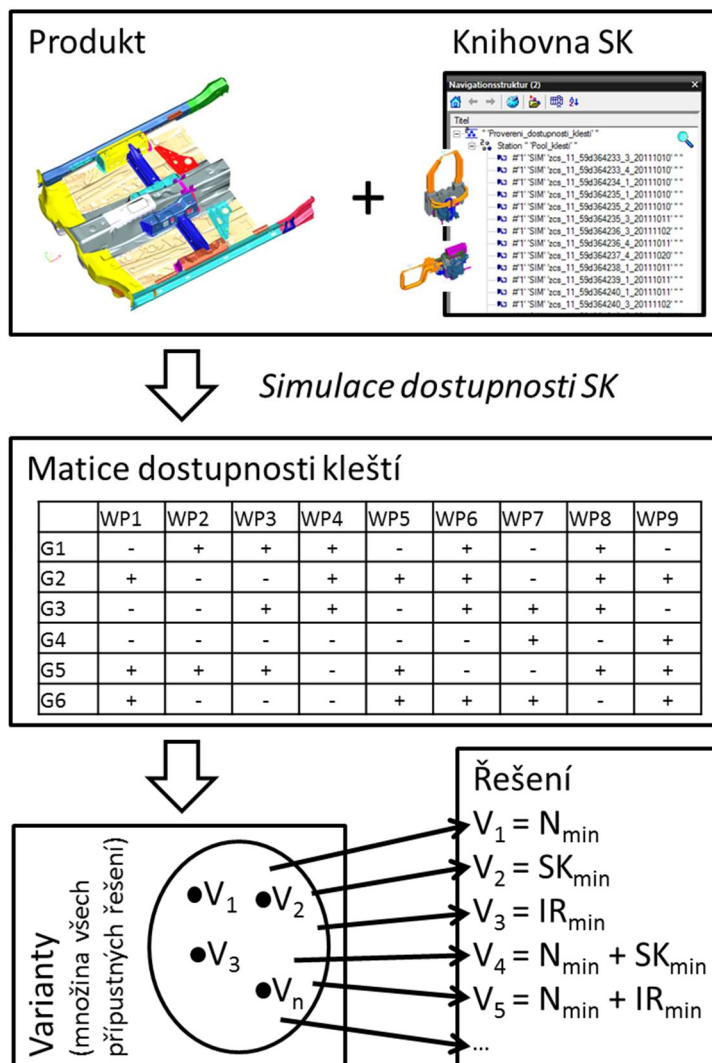
M_{dk} – matice dostupnosti kleští



$$V \in M_{dk} \text{ pro } a_{ij} = 1$$

kde:

V – množina všech přípustných variant



Obrázek 47 – Vizualizace optimalizační úlohy

Počet všech možných variant přípustných řešení je dán vztahem (5.2):

$$V = \sum_{k=1}^n \binom{n}{k} = \sum_{k=1}^n \frac{n!}{k! (n-k)!} \quad (5.2)$$

kde:

n – počet všech vyhovujících SK

k – hodnota kombinací vyhovujících SK



5.3. Optimalizace pomocí globálního algoritmu

Výsledkem kapitoly 4.1. je matice, která reprezentuje dostupnost jednotlivých svařovacích odporových kleští k daným odporovým svařovacím bodům. V této kapitole bude zkoumáno optimální řešení pro 2 varianty použitím globálního algoritmu – min. cena svařovacích kleští, kombinace min. ceny a min. hmotnosti.

5.3.1. Varianta 1 – cena

Nejprve bude zkoumána varianta s jedním parametrem a to cenou svařovacích kleští.

Pro „variantu 1“ budou základní proměnné definovány takto:

Tabulka 14 - Varianta 1 - základní proměnné

N_T	počet nářadí (např. svařovacích kleští)
N_W	počet úkolů (např. svařovacích bodů)
$\mathcal{H} = \{0, 1\}^{N_T \times N_W}$	matice proveditelnosti
$\mathcal{H}_{ij} = 0$	s i-tým nářadím nelze provést j-tý úkol
$\mathcal{H}_{ij} = 1$	s i-tým nářadím lze provést j-tý úkol
$\vec{P} \in \mathbb{R}^{N_T}$	cenový vektor
P_i	cena i-tého nářadí
$\vec{K} \in \mathbb{N}_0^{N_T}$	vektor konfigurace



K_i	plánované množství i-tého nářadí
$P = \sum_{j=1}^{N_T} K_j P_j$	celková cena
$\vec{U}^{\vec{K}} \in \{0, 1\}^{N_W}$	vektor úspěšnosti pro konfiguraci \vec{K}
$U_i^{\vec{K}} = 0$	i-tý úkol není proveditelný v konfiguraci \vec{K} (tzn. $\forall j: \mathcal{H}_{ji} = 0 \vee K_j = 0$)
$U_i^{\vec{K}} = 1$	i-tý úkol je proveditelný v konfiguraci \vec{K} (tzn. $\exists j: \mathcal{H}_{ji} = 1 \wedge K_j > 0$)
$V^{\vec{K}} = \sum_{j=1}^{N_W} U_j^{\vec{K}}$	celková úspěšnost konfigurace \vec{K}

Hledá se konfigurace \vec{K} , která minimalizuje celkovou cenu P za podmínky optimální úspěšnosti (tzn. $V^{\vec{K}} = N_W$, tedy s danou konfigurací lze provést všechny úkoly).

Jelikož se jedná o mnohodimenzionální úlohu s diskrétními parametry, bude zvolena jedna z variant globální evoluční optimalizace.

Nyní bude řešena výše popsaná úloha pomocí genetického evolučního algoritmu. K tomu bude použit optimalizační software Solver, což je doplněk tabulkového procesoru MS Excel.

Nejprve se převede matice výsledku dostupnosti odporových svařovacích kleští do binárního kódu (viz. Tabulka 15) a jsou zavedeny další proměnné (viz. Tabulka 16).



Tabulka 15 - Varianta 1 - výchozí matice

	WP1	WP2	WP3	WP4	WP5	WP12	WP13	WP14	WP15	Costs	Quantity	Result
G1	0	1	1	1	0	0	1	1	1	100	0	0
G2	1	0	0	1	1	1	1	0	0	140	0	0
G3	0	0	1	1	0	1	1	1	1	130	0	0
G4	0	0	0	0	0	0	0	0	1	90	0	0
G5	1	1	1	0	1	0	0	0	0	110	0	0
G6	1	0	0	0	1	1	0	1	1	100	0	0
G7	0	0	0	0	0	1	0	0	0	150	0	0
G8	1	1	0	0	0	0	1	0	1	135	0	0
G9	1	0	1	0	0	1	0	0	0	140	0	0
G10	0	0	1	0	0	1	0	0	1	150	0	0
G11	1	1	1	1	0	1	0	0	0	150	0	0
G12	1	1	1	1	1	0	0	0	1	150	0	0
G13	0	1	0	0	0	1	1	1	0	130	0	0
G14	1	1	1	0	1	0	1	0	1	150	0	0
G15	1	1	0	0	0	0	1	1	1	150	0	0
G16	0	1	0	0	0	0	0	1	0	140	0	0
G17	0	0	0	0	0	0	0	1	0	130	0	0
G18	0	0	0	0	1	0	0	0	1	150	0	0
G19	0	0	1	0	1	1	0	1	1	140	0	0
G20	1	1	0	1	0	1	1	0	0	150	0	0
												0
Checksum	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		

Jednotlivé proměnné znamenají:

Tabulka 16 - Varianta 1 – proměnné ve výchozí matici

G1 – G20	Svařovací kleště
WP1 – WP15	Odporový bodový svar
Costs	Cena svařovacích odporových kleští
Quantity	Kolik svařovacích kleští je pro optimální řešení třeba
Result	Množství x Cena
Checksum	Kontrolní součet, pro správný výsledek je třeba hodnota 1

V Tabulce 15 je „Checksum“ výpočet, který pro každý sloupec „WPx“ kontroluje, zda pro zkoumanou kombinaci svařovacích kleští je zachována podmínka dostupnosti. Proto musí být splněno, že výsledná optimální kombinace svařovacích kleští bude mít pro každý sloupec „WPx“ hodnotu 1.

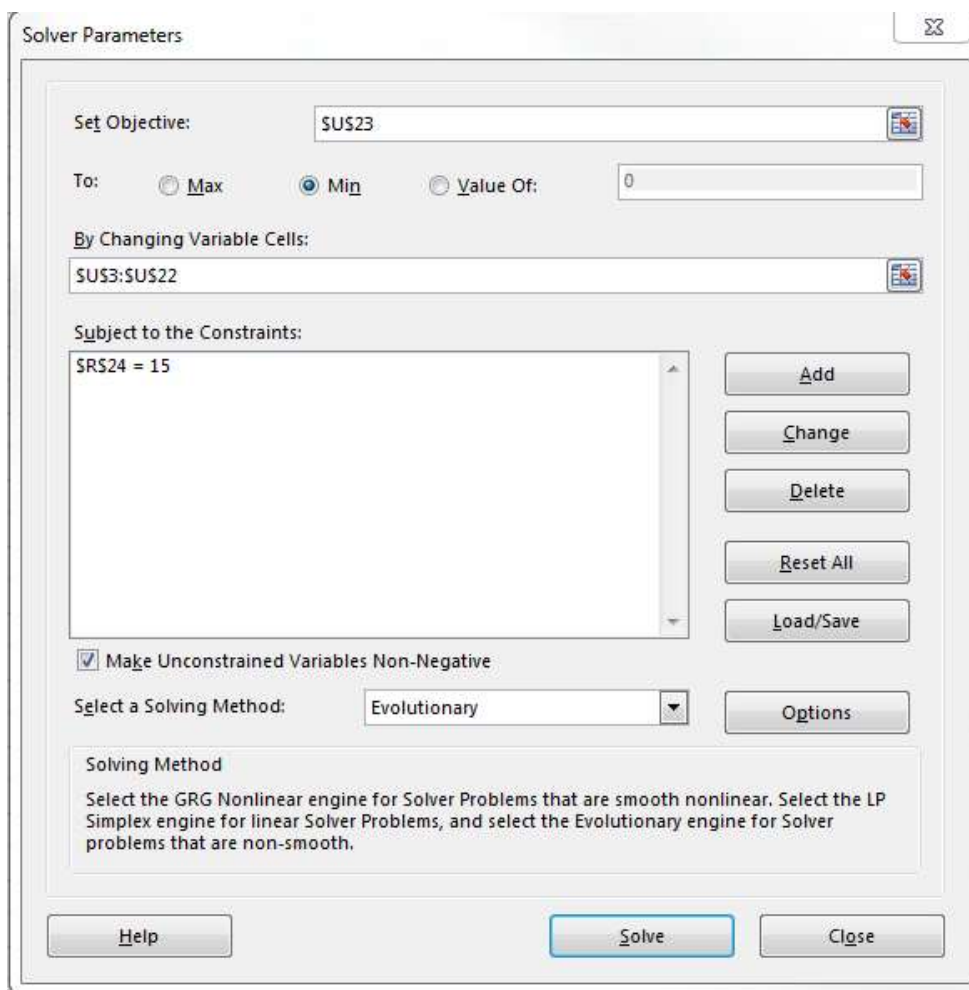


Teoretický počet všech možných kombinací pro celkový počet 20 svařovacích kleští (bez zohlednění dostupností k jednotlivým odporovým bodovým svarům), kde výsledkem mohou být jen jedny svařovací kleště, až kombinace všech 20 lze vyjádřit dle (5.3):

$$V = \sum_{k=1}^n \binom{n}{k} = \sum_{k=1}^n \frac{n!}{k! (n-k)!} = \sum_{k=1}^{20} \binom{20}{k} = \sum_{k=1}^{20} \frac{20!}{k! (20-k)!} = 1048575 \quad (5.3)$$

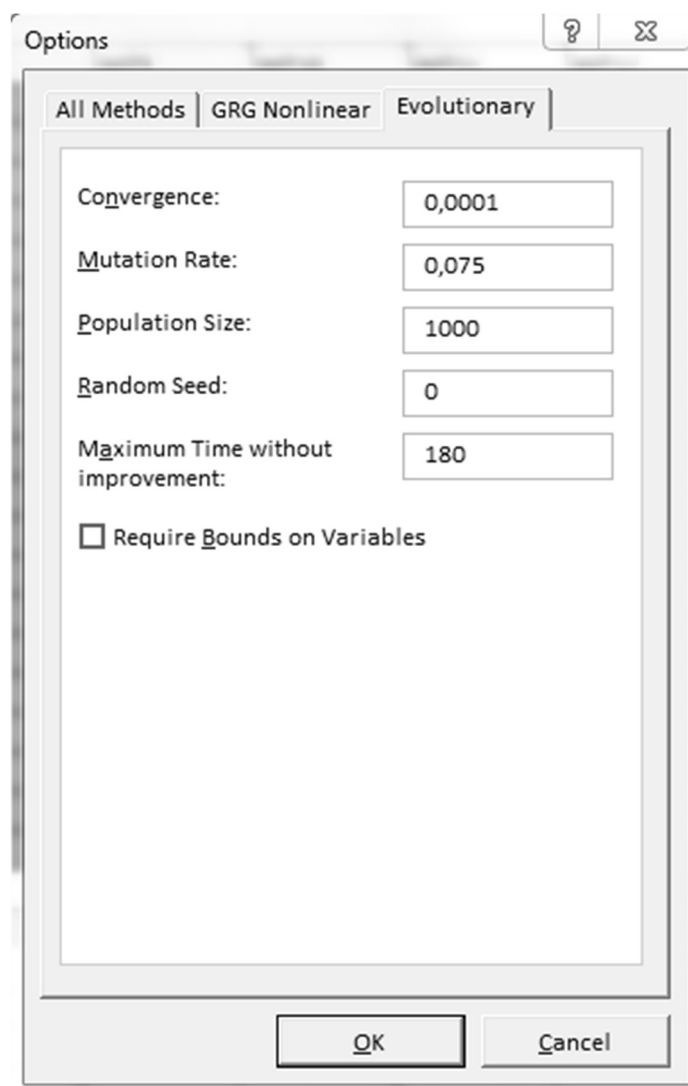
Nyní se v MS Excel, pod záložkou „Data“ spustí doplněk „Solver“ a nastaví se základní parametry.

V Obrázku 48 je potřeba nastavit v „Set Objective“ červené pole z Tabulky 15, do kterého bude po výpočtu zapsána nejnižší cena optimální kombinace svařovacích kleští. Jelikož hledáme min. kombinaci, je nutné nastavit přepínač na „Min“. Do „By Changing Variable Cells“ se nastaví množina polí „Result“ označené v Tabulce 15 hnědě. V „Subject to the Constraints“ se definuje pole označené v Tabulce 15 tmavě modře. Jelikož se řeší dostupnost 15 WP, musí být hodnota tohoto pole rovna 15. Dále se nastaví „Select a Solving Method“ na „Evolutionary“, čímž je zvolena optimalizační metoda evolučního globálního algoritmu.



Obrázek 48 - Výchozí nastavení Solveru

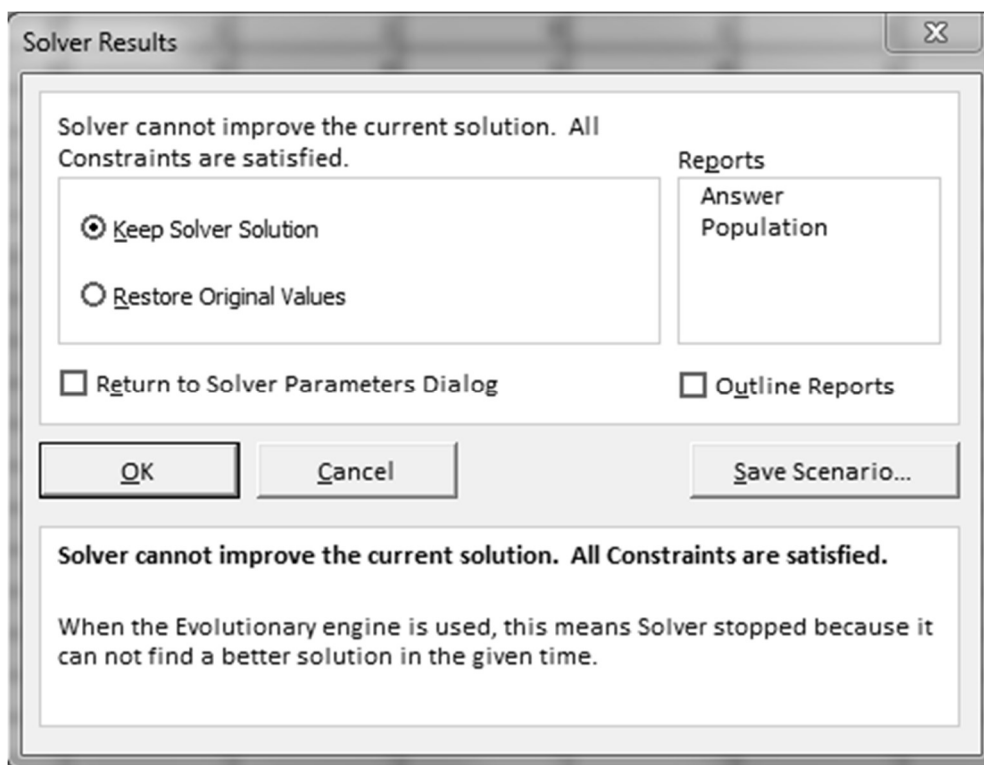
Jelikož je úloha relativně složitá a je nutné prověřit mnoho variant. Autor disertační práce doporučuje změnit základní nastavení doby optimalizace na 3 minuty (viz. Obrázek 49). Ostatní parametry zůstanou dle výchozího nastavení, viz. Obrázek 49.



Obrázek 49 – Změna parametru doby optimalizace na 180s

Nyní je spuštěna samotná optimalizace příkazem „Solve“, viz. Obrázek 48.

Po ukončení výpočtu je potvrzeno převzetí optimálního řešení nastavením přepínače na „Keep Solver Solution“ a potvrzením tlačítka „OK“, viz. Obrázek 50.



Obrázek 50 – Potvrzení převzetí výsledku

V Tabulce 17 je výsledek optimalizace:

Tabulka 17 - Varianta 1 - výsledná matice

	WP1	WP2	WP3	WP4	WP5	WP12	WP13	WP14	WP15	Costs	Quantity	Result
G1	0	1	1	1	0	0	1	1	1	100	0	0
G2	1	0	0	1	1	1	1	0	0	140	0	0
G3	0	0	1	1	0	1	1	1	1	130	1	130
G4	0	0	0	0	0	0	0	0	1	90	0	0
G5	1	1	1	0	1	0	0	0	0	110	1	110
G6	1	0	0	0	1	1	0	1	1	100	0	0
G7	0	0	0	0	0	1	0	0	0	150	0	0
G8	1	1	0	0	0	0	1	0	1	135	0	0
G9	1	0	1	0	0	1	0	0	0	140	0	0
G10	0	0	1	0	0	1	0	0	1	150	0	0
G11	1	1	1	1	0	1	0	0	0	150	0	0
G12	1	1	1	1	1	0	0	0	1	150	0	0
G13	0	1	0	0	0	1	1	1	0	130	0	0
G14	1	1	1	0	1	0	1	0	1	150	0	0
G15	1	1	0	0	0	0	1	1	1	150	0	0
G16	0	1	0	0	0	0	0	1	0	140	0	0
G17	0	0	0	0	0	0	0	1	0	130	0	0
G18	0	0	0	0	1	0	0	0	1	150	0	0
G19	0	0	1	0	1	1	0	1	1	140	0	0
G20	1	1	0	1	0	1	1	0	0	150	0	0
												240
Checksum	1	1	1	1	1	1	1	1	1	15		



Optimálním řešením (viz. Tabulka 17) je kombinace dvou svařovacích kleští G3 a G5 (hodnota „1“ ve sloupci „Quantity“ pro vybraný typ svařovacích kleští). Celková cena této kombinace je rovna hodnotě 240 (toto je fiktivní hodnota). Ještě je třeba zkontrolovat hodnotu „Checksum“, aby všechny hodnoty byly rovny 1 a celkový součet se shodoval s počtem odporových bodových svarů ($\sum WP = 15$). V tomto případě je suma „Checksum“ rovna 15, což podmínku splňuje.[H4]

5.3.2. Varianta 2 – kombinace ceny a hmotnosti

Další zkoumanou variantou bude kombinace ceny a hmotnosti svařovacích kleští.

V tomto případě budou základní proměnné rozšířeny vůči variantě 1 takto:

Tabulka 18 - Varianta 2 - rozšíření proměnných

$\vec{M} \in \mathbb{R}^{N_T}$	vektor hmotnosti
M_i	hmotnost i-tého nářadí
$M = \sum_{j=1}^{N_T} K_j M_j$	celková hmotnost
$P_M = \max_{1 \leq i \leq N_T} P_i$	max. cena nářadí
$M_M = \max_{1 \leq i \leq N_T} M_i$	max. hmotnost nářadí
$V = \sum_{j=1}^{N_T} K_j \left[\alpha \frac{P_j}{P_M} + (1 - \alpha) \frac{M_j}{M_M} \right]$	kombinovaná kritériální funkce
$\alpha \in < 0; 1 >$	váhový parametr



$\alpha = 0$	optimalizace vzhledem k celkové hmotnosti
$\alpha = 1$	optimalizace vzhledem k celkové ceně

Při existenci více optimalizačních cílů, je možné použít metody vícekritériální optimalizace. Tato optimalizace neposkytuje jen jedno optimum, ale množinu optimálních řešení, ze které je možné vybrat to, které odpovídá důležitosti jednotlivých cílů. Tato metoda se také nazývá „Paretové optimum“.

Jednotlivé proměnné v kombinované kritériální funkci jsou v rámci váženého průměru normalizovány pro případ, kdy by hodnoty cen a hmotností byly řádově odlišné (např. nevhodnou volbou jednotek).

Tabulka 19 - Varianta 2 - výchozí matice pro parametr α

	WP1	WP2	WP3	WP4	WP5	WP12	WP13	WP14	WP15	Costs	Weight	Combination	Quantity	Result	Costs	Weight
G1	0	1	1	1	0	0	1	1	1	100	100	0,714285714	0	0	0	0
G2	1	0	0	1	1	1	1	1	0	140	110	0,785714286	0	0	0	0
G3	0	0	1	1	0	1	1	1	1	130	140	1	0	0	0	0
G4	0	0	0	0	0	0	0	0	1	90	100	0,714285714	0	0	0	0
G5	1	1	1	0	1	0	0	0	0	110	140	1	0	0	0	0
G6	1	0	0	0	1	1	0	1	1	100	110	0,785714286	0	0	0	0
G7	0	0	0	0	0	1	0	0	0	150	110	0,785714286	0	0	0	0
G8	1	1	0	0	0	0	1	0	1	135	100	0,714285714	0	0	0	0
G9	1	0	1	0	0	1	0	0	0	140	90	0,642857143	0	0	0	0
G10	0	0	1	0	0	1	0	0	1	150	80	0,571428571	0	0	0	0
G11	1	1	1	1	0	1	0	0	0	150	80	0,571428571	0	0	0	0
G12	1	1	1	1	1	1	0	0	1	150	110	0,785714286	0	0	0	0
G13	0	1	0	0	0	1	1	1	0	130	100	0,714285714	0	0	0	0
G14	1	1	1	0	1	0	1	0	1	150	110	0,785714286	0	0	0	0
G15	1	1	0	0	0	0	1	1	1	150	80	0,571428571	0	0	0	0
G16	0	1	0	0	0	0	0	1	0	140	110	0,785714286	0	0	0	0
G17	0	0	0	0	0	0	0	1	0	130	100	0,714285714	0	0	0	0
G18	0	0	0	0	1	0	0	0	1	150	100	0,714285714	0	0	0	0
G19	0	0	1	0	1	1	0	1	1	140	90	0,642857143	0	0	0	0
G20	1	1	0	1	0	1	1	1	0	150	110	0,785714286	0	0	0	0
												0		0	0	0
Checksum	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0						

Výchozí matice z úlohy ve variantě 1 (viz. Tabulka 15) bude rozšířena o další parametr, hmotnost svařovacích kleští. Dále bude zaveden parametr α , jehož hodnota se v Tabulce 19 zapisuje do červeného pole. Tento parametr bude udávat váhu mezi cenou a hmotností a může nabývat hodnot mezi 0 a 1. Pokud



bude $\alpha=0$, bude optimalizace řešena vzhledem k hmotnosti. Pokud bude $\alpha=1$, bude optimální řešení vázáno k ceně. Takto je možno nastavit, v jakém poměru bude hmotnost k ceně.

Ve sloupci „Combination“ se pro každý řádek definují jednotlivé členy kombinované kritériální funkce, viz rovnice (5.4):

$$\left[\alpha \frac{P_j}{P_M} + (1 - \alpha) \frac{M_j}{M_M} \right] = \left[\alpha \frac{Cost}{Cost_{max}} + (1 - \alpha) \frac{Weight}{Weight_{max}} \right] \quad (5.4)$$

Ve sloupci „Cost“ úplně vpravo se pro každý řádek definuje, viz. vztah (5.5):

$$(Cost. Quantity) \quad (5.5)$$

Suma sloupce „Cost“ úplně vpravo v růžovém poli bude výsledkem ceny optimální kombinace svařovacích odporových kleští.

Ve sloupci „Weight“ úplně vpravo se pro každý řádek definuje, viz. vztah (5.6):

$$(Weight. Quantity) \quad (5.6)$$

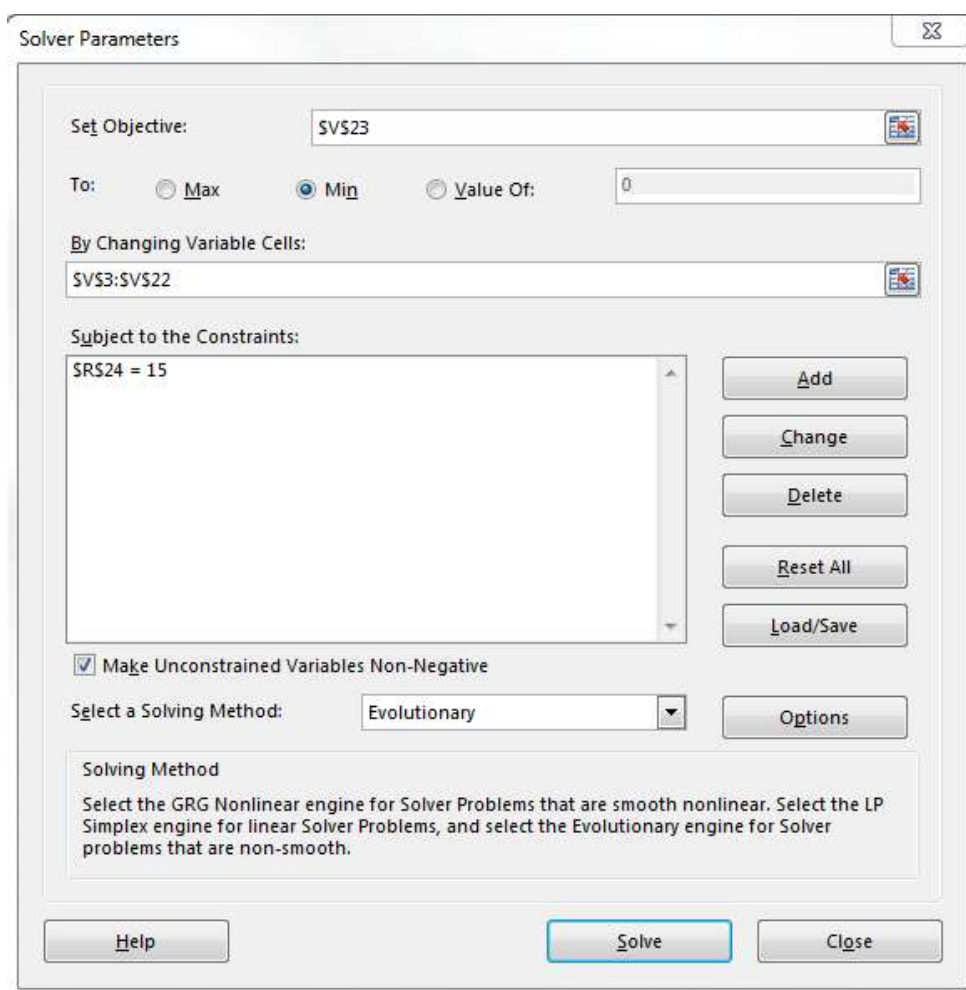
Suma sloupce „Weight“ úplně vpravo v růžovém poli bude výsledkem hmotnosti optimální kombinace svařovacích odporových kleští.

Tabulka 20 - Výchozí stav parametru α pro jednotlivé hodnoty od 0 do 1

α	celková cena	celková hmotnost	počet kleští
0	0	0	0
0,1	0	0	0
0,2	0	0	0
0,3	0	0	0
0,4	0	0	0
0,5	0	0	0
0,6	0	0	0
0,7	0	0	0
0,9	0	0	0
1	0	0	0

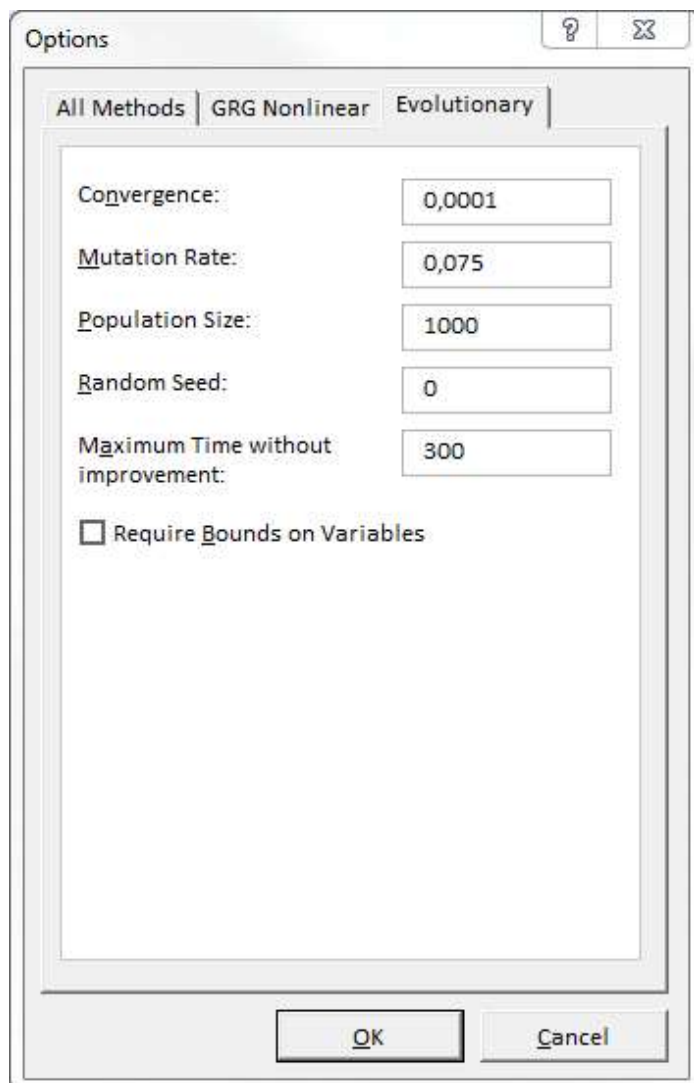
Optimalizační úloha bude řešena v 10 bodech od 0 do 1 po kroku 0,1. Tím se bude měnit váha řešení od hmotnosti k ceně. Výchozí stav je zapsán v Tabulce 20:

V Obrázku 51 je potřeba nastavit v „Set Objective“ červené pole z Tabulky 19, do kterého bude po výpočtu zapsána nejnižší cena optimální kombinace svařovacích kleští. Jelikož hledáme min. kombinaci, je nutné nastavit přepínač na „Min“. Do „By Changing Variable Cells“ se nastaví množina polí „Result“ označené v Tabulce 19 hnědě. V „Subject to the Constraints“ se definuje pole označené v Tabulce 19 tmavě modře. Jelikož se řeší dostupnost 15 WP, musí být hodnota tohoto pole rovna 15. Dále se nastaví „Select a Solving Method“ na „Evolutionary“, čímž je zvolena optimalizační metoda evolučního globálního algoritmu.



Obrázek 51 – Výchozí nastavení parametrů

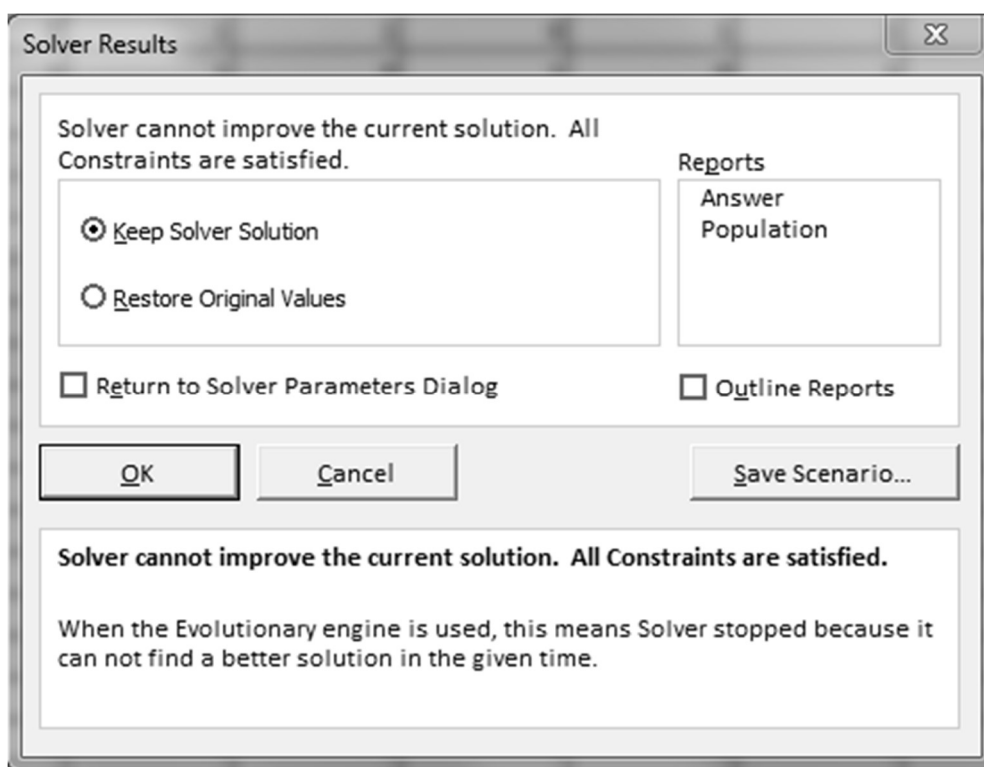
Vzhledem ke složitosti úlohy doporučuje autor disertační práce nastavit dobu optimalizace na 5 minut, viz. Obrázek 52. Ostatní parametry zůstanou dle výchozího nastavení, viz. Obrázek 52.



Obrázek 52 – Změna parametru doby optimalizace na 300s

Nyní je spuštěna samotná optimalizace příkazem „Solve“, viz. Obrázek 51.

Po ukončení výpočtu je potvrzeno převzetí optimálního řešení nastavením přepínače na „Keep Solver Solution“ a potvrzením tlačítka „OK“, viz. Obrázek 54.



Obrázek 53 – Potvrzení převzetí výsledku

Výsledek optimalizace pro hodnotu parametru $\alpha=0$ je v Tabulce 21. Součet ceny svařovacích odporových kleští je v tomto případě roven 440. Součet hmotností svařovacích odporových kleští je roven 250.

Tabulka 21 - Varianta 2 - výsledná matice pro parametr $\alpha=0$

	WP1	WP2	WP3	WP4	WP5	WP12	WP13	WP14	WP15	Costs	Weight	Combination	Quantity	Result	Costs	Weight
G1	0	1	1	1	0	0	1	1	1	100	100	0,714285714	0	0	0	0
G2	1	0	0	0	1	1	1	1	0	140	110	0,785714286	0	0	0	0
G3	0	0	1	1	0	1	1	1	1	130	140	1	0	0	0	0
G4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	90	100	0,714285714	0	0	0	0
G5	1	1	1	0	1	0	0	0	0	110	140	1	0	0	0	0
G6	1	0	0	0	0	1	1	0	1	100	110	0,785714286	0	0	0	0
G7	0	0	0	0	0	1	0	0	0	150	110	0,785714286	0	0	0	0
G8	1	1	0	0	0	0	0	1	0	135	100	0,714285714	0	0	0	0
G9	1	0	1	0	0	1	0	0	0	140	90	0,642857143	0	0	0	0
G10	0	0	1	0	0	1	0	0	1	150	80	0,571428571	0	0	0	0
G11	1	1	1	1	0	1	0	0	0	150	80	0,571428571	1	0,57142857	150	80
G12	1	1	1	1	1	1	0	0	1	150	110	0,785714286	0	0	0	0
G13	0	1	0	0	0	1	1	1	0	130	100	0,714285714	0	0	0	0
G14	1	1	1	0	1	0	1	0	1	150	110	0,785714286	0	0	0	0
G15	1	1	0	0	0	0	1	1	1	150	80	0,571428571	1	0,57142857	150	80
G16	0	1	0	0	0	0	0	0	1	140	110	0,785714286	0	0	0	0
G17	0	0	0	0	0	0	0	1	0	130	100	0,714285714	0	0	0	0
G18	0	0	0	0	1	0	0	0	1	150	100	0,714285714	0	0	0	0
G19	0	0	1	0	1	1	0	1	1	140	90	0,642857143	1	0,64285714	140	90
G20	1	1	0	0	1	0	1	1	0	150	110	0,785714286	0	0	0	0
Checksum	1	1	1	1	1	1	1	1	1	15		0		1,78571429	440	250



Takto se pokračuje s optimalizací pro další hodnoty parametru α , viz. Tabulka 22. Po optimalizaci ve všech krocích parametru α , je výsledek zapsán do Tabulky 22.

Tabulka 22 - Varianta 2 - výsledky pro všechny parametry α

α	celková cena	celková hmotnost	počet kleští
0	440	250	3
0,1	440	250	3
0,2	240	280	2
0,3	240	280	2
0,4	240	280	2
0,5	240	280	2
0,6	240	280	2
0,7	240	280	2
0,9	240	280	2
1	240	280	2

Z Tabulky 22 je patrné, že optimálním řešením vzhledem k hmotnosti, je kombinace 3 typů svařovacích kleští a to G11, G15 a G19, kdy je celková hmotnost rovna hodnotě 250 a současně cena je rovna 440.

Vhledem k ceně je optimální kombinace 2 svařovacích odporových kleští G3 a G5, což je stejný výsledek jako pro variantu 1, kde je celková cena rovna hodnotě 240 a současně je součet hmotností roven 280.

Ještě je třeba zkontrolovat hodnotu „Checksum“ v Tabulce 21, aby všechny hodnoty byly rovny 1 a celkový součet se shodoval s počtem odporových bodových svarů ($\sum WP = 15$). V tomto případě je suma „Checksum“ rovna 15, což podmínku splňuje.



6. Důsledky pro vědu a praxi

Pro zmapování stavu problematiky byly použity výsledky z vědeckých a odborných článků, konferencí z oblasti automobilového průmyslu a simulací výrobního procesu. Dále bylo využito znalostí autora disertační práce z oboru projektování výrobního zařízení ve svařovně a podpora tohoto návrhu pomocí nástrojů digitální továrny. Problematikou se autor zabývá více jak 10 let v automobilce ŠKODA AUTO a.s. v oddělení Plánování svařoven. Pro prohloubení znalostí této problematiky absolvoval autor v letech 2015-2017 zahraniční výměnný program v automobilce Volkswagen v německém Wolfsburgu. Možnosti využití nástrojů digitální továrny byly konzultovány se zástupci digitálního systému PD (Process Designer) od firmy Siemens, používaného v koncernu Volkswagen, ale také se zástupci dalšího hromadně používaného systému DPE (Delmia Process Engineer) od firmy Dassault Systemes. Získané znalosti a potřeba vyřešení optimálního výběru svařovacích odporových kleští, byla motivací ke vzniku této disertační práce.

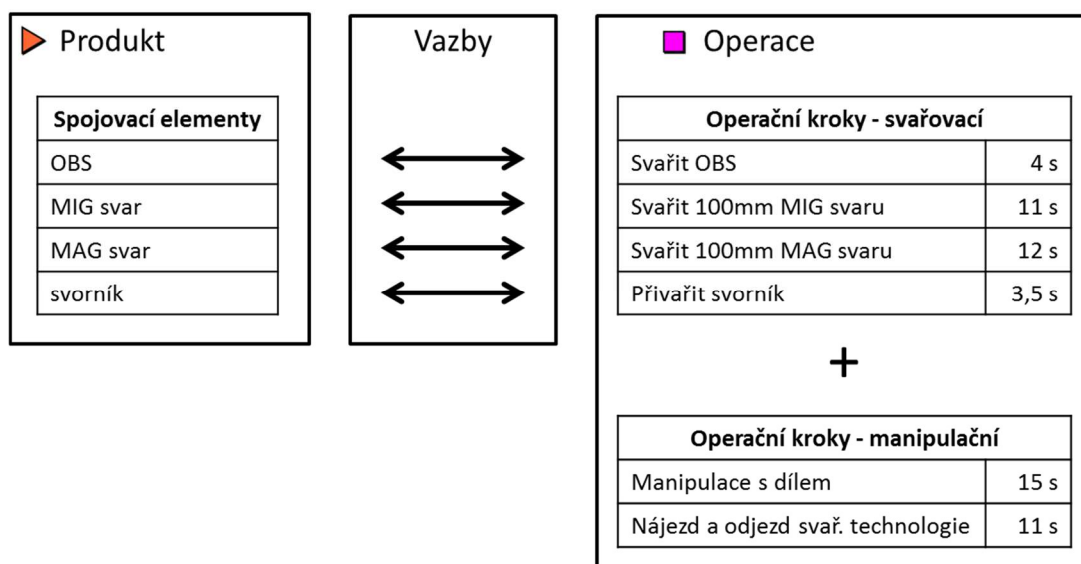
Výsledek disertační práce ukazuje, že i v dnešní době, kdy jsou k dispozici různé systémy podporující proces projektování výrobního zařízení, neobsáhnou tyto celou problematiku. Jak je vidět, v tomto případě zcela chybí systémová podpora pro výběr vhodného výrobního nástroje. Proto je touto prací tento nedostatek eliminován použitím optimalizovaného výběru mimo prostředí digitální továrny.

Do budoucna je však doplnění takového výběru do systémů DF velice žádané. Systémová podpora při výběru výrobního zařízení by ušetřila mnoho času a tím také náklady. Takovéto propojení simulace a automatizovaného výběru svařovacích kleští by vedlo k autonomizaci projektování výrobního zařízení. Proto musí probíhat jednání s výrobcí systémů DF, aby k tomuto rozšíření v budoucnosti došlo.

Moderní systémy PLM (Product Lifecycle Management) umožňují spolupráci při vývoji karosérie mezi konstruktérem a technologem. Spolupráce spočívá v tom, že technolog prověří vyrobiteľnost karosérie a navrhuje požadované úpravy tak, aby výroba karosérie byla co nejjednodušší a ekonomicky výhodná. Tato výměna dat probíhá v jednom systému. Pokud by se dal systém PLM

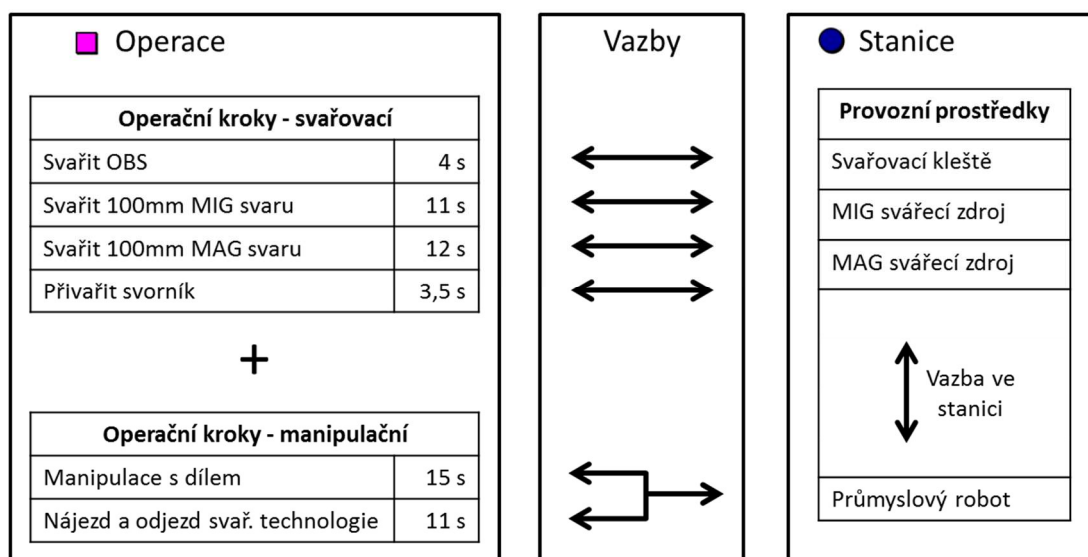
nastavit tak, že bychom dokázali definovat vazby mezi svařovacím elementem, výrobní operací a výrobním nástrojem, vedlo by to k další autonomizaci projektování svařovacího zařízení.

V dnešní době sice existují knihovny operačních kroků (činností), ale vazbu mezi produktem a operačním krokem definuje projektant ručně. Je proto nutné definovat požadavky na systém DF, kde bude umožněno předem definovat vazby typu produkt – operační krok (viz. Obrázek 54). Takto by byl vznikající produkt (v technické konstrukci) aktivně svázán s výrobními operacemi. Tzn. mít aktuální přehled svařovacích činností a tím pádem také přehled o výrobním čase bez ručního zásahu projektanta.



Obrázek 54 - Vazby mezi produktem a operací

Svařovací operační kroky je nutné doplnit o manipulační a přejezdové operační kroky. Tyto operační kroky ale nejsou vázány na produkt, vazba vzniká mezi stanicí a krokem.



Obrázek 55 - Vazby mezi operací a výrobní technologií

Dále je nutné definovat vazby mezi operacemi a výrobní technologií (viz. Obrázek 55). Některé operační kroky lze jednoznačně přiřadit k provozním prostředkům, protože se jak svařovací zdroj, tak i hořák nemění. To zahrnuje svařovací technologii pro obloukové svařování MIG/MAG, laserové svařování apod.

V případě odporového bodového svařování je tato otázka složitější. Vzhledem ke geometrickému tvaru svařence a polohou OBS je nutné vybrat takové svařovací odporové kleště, které při svařování nebudou v kolizi s daným dílem, což je předmětem řešení této disertační práce.

Disertační práce se zabývá výběrem svařovacích odporových kleští na základě simulací dostupnosti. To však není konečné použití. Tuto metodu lze použít u všech podobných výrobních technologií. Nespornou výhodou bude mít toto řešení při návrhu výrobního zařízení pro výrobu karosérie z hliníku. Používané spojovací technologie jako např. nýtování, klinčování, třecí svařování, šroubování FDS apod. jsou realizovány bodově a pro ověření dostupnosti se využívá stejných simulací jako pro odporové bodové svařování.



7. Diskuse výsledků a závěr

Předložená disertační práce se na začátku zabývá poznatky z oboru navrhování výrobních systémů a procesů. V dnešní době se navrhování výrobních linek v automobilovém průmyslu neobejde bez nástrojů digitální továrny, kde je vyzdvížena simulace výrobních nástrojů a jejich využití.[H3] Na závěr rešerše je zhodnocení optimalizačních metod a volba jedné metody pro optimalizaci výběru svařovacích odporových kleští a to evolučních globálních algoritmů.

V kapitole 4. je podrobně popsána systematika projektování výrobního zařízení pro výrobu karosérie, využití systémů digitální továrny k tomuto projektování až po simulaci robotických pracovišť.[H6]

V kapitole 5. je vlastní experiment. Nejprve je provedena simulace dostupností svařovacích odporových kleští, jejíž výsledkem je matice tohoto prověření, která je vstupním členem pro řešení optimalizace výběru těchto svařovacích kleští.[H4] Dále je řešena optimalizace výběru pomocí globálních evolučních algoritmů na základě proměnných:

- cena svařovacích kleští
- kombinace ceny a hmotnosti svařovacích kleští.

Zhodnocení výsledků „Varianta 1 – cena“, zda je řešení z kapitoly 5.3.1. optimální. Ideální by bylo, kdyby byly výsledkem jen jedny svařovací kleště. Z Tabulky 15 však neexistují ani jedny svařovací kleště, které by byly schopny bezkolizně svařit všech 15 OBS. Takové řešení neexistuje. Parametrem je cena kleští. Z Tabulky 15 lze vypočítat, že neexistuje žádná jiná kombinace dvou svařovacích kleští, kde by cena byla nižší než 240 při zachování podmínky bezkolizního svaření 15 OBS. Ještě existuje možnost kombinace 3 svařovacích odporových kleští. Ani tady neexistuje žádná kombinace 3 svařovacích kleští, kde by cena byla nižší než 240 při zachování podmínky bezkolizního svaření 15 OBS (nejnižší je cena 290 u kombinace 3 kleští G1, G4 a G6 a přitom není zachována podmínka bezkolizního svaření 15 OBS). Proto je kombinace 2 svařovacích kleští G3 a G5 pro tuto úlohu (viz. Tabulka 15) optimální.[H4]



V tomto případě je pro 20 typů svařovacích kleští, kde každé jsou schopné svařit alespoň jeden odporový bodový svar, možno vytvořit více jak 1,04 mil. kombinací svařovacích kleští (viz. rovnice (5.3)). Pomocí programu Solver byla optimální kombinace nalezena po prověření 119 500 kombinací, což je asi 11 % všech možných kombinací.[H5] Doba optimalizace, prováděné pomocí softwarového doplňku Solver, byla 3min, což je dle autora disertační práce přijatelná hodnota.

Zhodnocení výsledků „Varianta 2 – kombinace ceny a hmotnosti“, zda je řešení z kapitoly 5.3.2. optimální. Z Tabulky 22 je patrné, že optimálním řešením vzhledem k hmotnosti, je kombinace 3 typů svařovacích kleští a to G11, G15 a G19, kdy je celková hmotnost rovna hodnotě 250 a současně cena je rovna 440.

Vzhledem k ceně je optimální kombinace 2 svařovacích odporových kleští G3 a G5, což je stejný výsledek jako pro variantu 1, kde je celková cena rovna hodnotě 240 a současně je součet hmotností roven 280. Mezi tím neexistuje jiné řešení. Od hodnoty parametru $\alpha=0,2$ je dominantní váha ceny, viz. Tabulka 22.

V tomto případě je možno vytvořit také více jak 1,04 mil. kombinací svařovacích odporových kleští. Pomocí doplňku Solver bylo tohoto řešení dosaženo za necelou 1 hodinu, přičemž pro každé α trvala optimalizace 5 minut, což je dle autora disertační práce také přijatelná hodnota.

Do této doby probíhá výběr svařovacích kleští na základě znalostí a poznatků projektanta výrobního zařízení. Může tím docházet k chybám ve výběru, anebo k takovému výběru, který nebude optimálním.

Pokud aplikujeme navrženou metodu na příkladu karosérie Škoda Rapid, tak počet odporových bodových svarů je 4264 (viz. Tabulka 3). Při hloubce výroby 74% je nutné svařit na svařovně 3156 bodů. Pro takový počet odporových svařovacích bodů je nutné provést simulaci dostupnosti a dle výsledné matice vybrat ideální svařovací kleště. V dnešní době trvá takový výběr v řádech dnů až týdnů. Použitím navržené optimalizace výběru se dostáváme do řádu minut až hodin. Jak je uvedeno na příkladu, použitím evolučního globálního algoritmu je



docíleno optimálního výběru po prověření zhruba 10% všech možných kombinací.

Toto urychlení procesu umožní na jedné straně úsporu nákladů a na straně druhé zkrácení doby realizace nového modelu karosérie.

Uvedenou metodu je možné uplatnit při projektování výstavby nového zařízení, kdy je třeba minimalizovat investiční náklady. Jak je popsáno v [11], čím dál větší důraz je kladen na využití výrobního zařízení, které je již v provozu. V tomto případě mluvíme o integraci nové karosérie do stávající výroby. Při spojení v článku [11] navrženém způsobu kombinace simulace svařovacích odporových kleští a s vývojem karosérie a s optimalizací výběru, dalo by se docílit ještě lepšího využití svařovacích kleští. Pokud bychom docílili možnosti úpravy polohy odporového svařovacího bodu na základě simulace dostupnosti a optimalizaci výběru, vedlo by to k dalšímu snižování potřebných typů svařovacích kleští, a tím k dalšímu snižování investic.

Dále je možné tuto metodu využít při projektování svařovny již vyráběného modelu do jiného výrobního závodu. Jelikož je v tuto chvíli známý kompletní seznam potřebných svařovacích odporových kleští, bylo by možné dodatečnou analýzou a optimalizací výběru dosáhnout dalšího zlepšení ve formě snížení typů svařovacích odporových kleští.



8. Splnění cílů

Cíl této disertační práce definovaný v kapitole 3, jako návrh optimalizační metody pro výběr svařovacích odporových kleští, je v celém rozsahu splněn i s definovanými dílčími cíli. Nejprve byla provedena simulace dostupnosti svařovacích odporových kleští na svařenci „podlaha přední“, která je součástí karosérie Škoda Rapid. Výsledkem této simulace je matice, která obsahuje informaci o dostupnosti svařovacích kleští k odporovým bodovým svarům. Pro získání optimálního výběru svařovacích odporových kleští je navrženo použití globálního evolučního algoritmu. Pro řešení je použit softwarový doplněk Solver, který je součástí tabulkového procesoru MS Excel z kancelářského balíku MS Office.

Výsledek této práce může být implementován do procesu projektování výrobních systémů a procesů pro výrobu karosérie nebo jiných svařenců, kde je pro spojování použito odporové bodové svařování, jako např. v automobilce ŠKODA AUTO a.s. Toto řešení umožňuje přesnější výběr svařovacích odporových kleští.



9. Seznam použité literatury

1. *Výrobní systém* [online]. Praha: API, 2011 [cit. 2013-09-21]. 1. Dostupné z: <http://e-api.cz/page/67818.vyrobni-system-efektivni-vyroba>.
2. *Štíhlý a inovativní podnik* [online]. Praha: API, 2011 [cit. 2013-10-10]. 2. Dostupné z: <http://e-api.cz/page/68252.stihly-a-inovativni-podnik>.
3. *Výrobní systém Toyota TPS a jeho přínosy pro podnikání* [online]. Praha: Toyota Forklifts, 2012 [cit. 2013-10-15]. 3. Dostupné z: http://www.toyota-forklifts.cz/sitecollectiondocuments/tps_nahled.pdf.
4. ZELENKA, Antonín. *Projektování výrobních procesů a systémů*. 1. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2007. ISBN 978-80-01-03912-0.
5. LUCKO, A., H. BROCKMEYER a F. MANTWILL. Frühzeitige Produktbeeinflussung und Produktabstimmung im automobilen Karosseriebau – Das Projekt Pro2Kar. In: DFX 2007: Proceedings of the 18th Symposium on Design for X. Neukirchen/Erlangen, Germany: Design Society, 2007, s. 53-64. ISBN 987-3-9808539-5-8. ISSN 987-3-9808539-5-8.
6. DAO, Son Duy, Kazem ABHARY a Romeo MARIAN. An improved genetic algorithm for multidimensional optimization of precedence-constrained production planning and scheduling. In: Journal of Industrial Engineering International. 2017, 13(2), s. 143-159. DOI: 10.1007/s40092-016-0181-7. ISSN 1735-5702. Dostupné také z: <http://link.springer.com/10.1007/s40092-016-0181-7>.
7. ZELENKA, Antonín, Luděk VOLF a Antonie POSKOČILOVÁ. *Projektování výrobních systémů: návody na cvičení*. V Praze: České vysoké učení technické, 2009. ISBN 978-80-01-04394-3.
8. VOLF, Luděk. Počítačová simulace v oblasti navrhování a optimalizace výrobních systémů. In: *Konference STČ 2010*. Praha, 2010. ISBN 978-80-01-04533-6. Dostupné také z: <http://stc.fs.cvut.cz/pdf/VolfLudek-301296.pdf>.
9. VÁCLAV, Štefan, Peter KOŠTÁL, Šimon LECKÝ, Dávid MICHAL a Branislav BAKO. *Assembly System Planning in Automotive Industry with Use of Discrete Event Simulation*. In: . Cham: Springer International Publishing, 2018, s. 503-515. ISBN 978-3-319-75677-6.



10. GONG, X., J. LANDAHL, H. JOHANNESSON a R. JIAO. Simulation-driven manufacturing planning for product-production variety coordination. In: *2017 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)*. IEEE, 2017, 2017, s. 2039-2043. DOI: 10.1109/IEEM.2017.8290250. ISBN 978-1-5386-0948-4. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/8290250>.
11. WALLA, W. Design for Reuse of Production Equipment. In: *DFX 2010: Proceedings of the 21th Symposium on Design for X*. Buchholz/Hamburg, Germany: Design Society, 2010, s. 181-192. ISBN 978-3-941492-23-3.
12. FUH, JYH, YS WONG, CY YEE, L ZHUANG a KS NEO. Modelling, analysis and simulation for the design of a robotic assembly system. In: *Computer Integrated Manufacturing Systems*. 1996, 9(1), s. 19-31. DOI: 10.1016/0951-5240(95)00028-3. ISSN 09515240. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0951524095000283>.
13. JOHTELA, Tommi, Jouni SMED, Mika JOHNSON, Risto LEHTINEN a Olli NEVALAINEN. Supporting production planning by production process simulation. In: *Computer Integrated Manufacturing Systems*. 1997, 10(3), s. 193-203. DOI: 10.1016/S0951-5240(97)00008-6. ISSN 09515240. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0951524097000086>.
14. SCHULZE, Hartmut, Henning BRAU, Siegmund HAASIS, Michael WEYRICH a Tobias RHATJE. Human-Centered design of engineering applications: Success factors from a case study in the automotive industry. In: *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing*. 2005, 15(4), s. 421-443. DOI: 10.1002/hfm.20036. ISSN 1090-8471. Dostupné také z: <http://doi.wiley.com/10.1002/hfm.20036>.
15. MUJBER, T.S., T. SZECSI a M.S.J. HASHMI. Virtual reality applications in manufacturing process simulation. In: *Journal of Materials Processing Technology*. 2004, 155-156, s. 1834-1838. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2004.04.401. ISSN 09240136. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924013604005618>.



16. KOŽÍŠEK, Jan a Barbora STIEBEROVÁ. *Statistická a rozhodovací analýza*. 2. vyd. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2014. ISBN 978-80-01-05509-0.
17. STREICHERT, Felix. *Introduction to Evolutionary Algorithms* [online]. 1991, , 21 [cit. 2015-03-05]. Dostupné z: http://www.ra.cs.uni-tuebingen.de/mitarb/streiche/publications/Introduction_to_Evolutionary_Algorithms.pdf.
18. YU, Xinjie a Mitsuo GEN. *Introduction to evolutionary algorithms*. New York: Springer, c2010.
19. JI, Wei, Shubin YIN a Lihui WANG. A big data analytics based machining optimisation approach. *Journal of Intelligent Manufacturing*. 2019, 30(3), 1483-1495. DOI: 10.1007/s10845-018-1440-9. ISSN 0956-5515. 19. Dostupné také z: <http://link.springer.com/10.1007/s10845-018-1440-9>.
20. WEISE, Thomas. *Global optimization algorithms-theory and application* [online]. Munich/Germany, 2009 [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: https://www.kau.edu.sa/Files/830003/Files/57574_Global%20Optimization%20Algorithms%20Theory%20and%20Application_Part1.pdf.
21. KENNEDY, J. a R. EBERHART. Particle swarm optimization. In: *Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks*. IEEE, 1995, s. 1942-1948. DOI: 10.1109/ICNN.1995.488968. ISBN 0-7803-2768-3. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/488968>.
22. HAUNSTETTER, Thomas. *Methoden des Data Mining in Anwendung an die Flexibilitätattribute des automobilen Karosseriebaus zur strategischen Investitionsplanung*. Hamburg/Germany, 2010, 173 s. Disertační práce. Universität der Bundeswehr Hamburg.
23. Škoda Rapid. In: *14th Global Car Body Benchmarking Conference*. Bad Nauheim/Germany: Automotive Circle International, 2012, s. 305-328.
24. FOREJTOVÁ, Lucie, Ladislav KOLAŘÍK, Jan SUCHÁNEK, Marie KOLAŘÍKOVÁ a Tomáš PILVOUSEK. *Svařitelnost ocelí pro automobilové karoserie* [online]. In: . MM Průmyslové spektrum, 2017 [cit. 2018-02-15]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/svaritelnost-oceli-pro-automobilove-karoserie.html>.



25. The All-New Range Rover. In: *14th Global Car Body Benchmarking Conference*. Bad Nauheim/Germany: Automotive Circle International, 2012, s. 256-272.
26. *Technologie obloukového svařování* [online]. 2012 [cit. 2013-11-21]. Dostupné z: <http://www.toolscomp.cz/technologie/pohled-do-technologie-svarovani-mig-mag>.
27. *Bodovky a bodování: Svařování elektrickým odporem* [online]. 2008 [cit. 2015-04-11]. Dostupné z: <http://svarbazar.cz/phprs/view.php?cislocclanku=2008033102>.
28. BARTOŠEK, Petr. *Využití bodového svařování ve strojírenském průmyslu*. Brno, 2013, 43 s. Diplomová práce. Mendelova univerzita v Brně.
29. *Technologie svařování a zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. Ostrava: ZEROSS, 2001. Svařování. ISBN 80-857-7181-0.
30. TICHÝ, Jiří. *Svařování v automobilovém průmyslu* [online]. Svět Svaru, 2007 [cit. 2013-03-10]. Dostupné z: http://www.hadyna.cz/svetsvaru/technology/Sva%C5%99.v.Automob_2007.pdf.
31. *Nový standard ve svařovací technice Proces CMT (Cold Metal Transfer)* [online]. Technický týdeník, 2006 [cit. 2014-09-13]. Dostupné z: <http://www.techtydenik.cz/detail.php?action=show&id=93&mark=cmt>.
32. *CMT Advanced: Vyšší odtavný výkon, lepší přemostění spár a vyšší stabilita* [online]. [cit. 2018-11-14]. Dostupné z: <https://www.fronius.com/cs-cz/czech-republic/perfect-welding/o-svarovani/svarovaci-procesy/cmt-advanced>.
33. VÁLOVÁ, Marie a Ladislav KOLAŘÍK. Perspektivní metody spojování materiálů - Přivařování svorníků. In: *Nové metody a postupy v oblasti přístrojové techniky*,. Praha: ČVUT v Praze, 2009, s. 137-144. ISBN 978-80-01-04353-0.
34. HADYNA, Daniel. *Současná moderní technika pro laserové aplikace – na robotizovaných pracovištích* [online]. Svět Svaru, 2015 [cit. 2016-05-29]. Dostupné z: http://www.svetsvaru.cz/wp-content/uploads/2015/09/2015-2_Laserove.aplikace.pdf.



35. PILVOUSEK, Tomáš, Lubomír ROLEČEK a Jan ŠANOVEC. *Lepení ve výrobě karoserie* [online]. MM Průmyslové spektrum, 2017 [cit. 2018-04-22]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/lepeni-ve-vyrobe-karoserie.html>.
36. *Falzsyste* [online]. 2018 [cit. 2018-10-21]. Dostupné z: <https://www.kuka.com/de-de/produkte-leistungen/produktionsanlagen/standardprodukte-f%C3%BCr-die-automatisierung/falzsyste>.
37. *AutoForm-HemPlannerplus* [online]. 2018 [cit. 2018-10-21]. Dostupné z: <https://www.autoform.com/de/produkte/autoform-hemplanner-plus>.
38. DUROŇ, Jiří. *Simulace svařování na pracovišti robotické výrobní linky Škoda YETI*. Praha, 2012. Diplomová práce. ČVUT v Praze.
39. SIEMENS INDUSTRY SOFTWARE GMBH & CO. *Pilotprojekt zur Evaluierung der Virtuellen Inbetriebnahme mit Process Simulate*. Erlangen/Germany, 2011.
40. STEHLÍK, Eduard. *Základy marketingu*. Praha: Vysoká škola ekonomická, 1999, 220 s. ISBN 80-707-9527-1.
41. KRIŠŤÁK, Josef. *MTM - Methods Time Measurement* [online]. 2007 [cit. 2018-10-10]. Dostupné z: <https://www.ipaczech.cz/cz/ipa-slovník/mtm-methods-time-measurement>.



10. Publikace autora

- H1. HYNEK, P. *Odporové bodové svařování přes 3 plechy*. Praha, 2003. Diplomová práce. ČVUT v Praze.
- H2. HYNEK, P. *Porovnání MAG svařování a MIG pájení*. Praha, 2006. Diplomová práce. ČVUT v Praze.
- H3. HYNEK, P., FÁBORSKÝ, R. a BEDNÁR, A. Škoda využívá virtuální provoz, aby snížila rizika a ušetřila čas. In: *Automobil Industry*, 2013, 2, s. 8 – 11. ISSN 1802-5196.
- H4. HYNEK, P. Výběr optimální kombinace výrobních nástrojů využitím evolučního algoritmu. In: *International Masaryk Conference*. 2018. Hradec Králové. Magnanimitas. 2018, s. 1157 – 1168. ISBN 978-80-87952-27-6.
- H5. HYNEK, P., KREIBICH, V. a FIRT R. Suitable production tools selection with the use of evolutionary algorithms. *Acta Polytechnica*. [před vydáním]. 2019. ISSN 1210-2709.
- H6. HYNEK, P. Inovace ve výrobě. *Povrcháři*. 2019, 1, s. 15 – 19. ISSN 1802-9833.

Vyzvané přednášky:

- P1. HYNEK, P. a VLČEK, T. *Virtuální zprovoznění robotických linek ve svařovně*. [přednáška]. Brno: Trendy v automatizaci a robotizaci 2017, Trade Media Int., 25. – 26. 1. 2017.
- P2. HYNEK, P. Krok za krokem výrobou ve ŠA. [přednáška]. Plzeň: ZČU, 11. 5. 2017.
- P3. HYNEK, P. Implementace MRK robotů ve ŠKODA AUTO a.s.. [přednáška]. Brno: Trendy v automatizaci a robotizaci 2018, Trade Media Int., 31. 1. – 1. 2. 2018.
- P4. HYNEK, P. MRK bei Skoda. [přednáška]. Wolfsburg DE: Forum Mensch-Roboter-Kooperation, 28. 2. – 1. 3. 2018.
- P5. HYNEK, P. a POLÁŠEK-FILOVÁ, J. Digitalizace ve výrobě. [přednáška]. Praha: Business & Analytics Forum, 15. 3. 2018.
- P6. HYNEK, P. Kolaborativní robotika. [přednáška]. Praha: CIIRC, 11. 4. 2018.



- P7. HYNEK, P. Plánování svařoven. [přednáška]. Mladá Boleslav: ŠAVŠ, 23. 10. 2018.
- P8. HYNEK, P. Digitální plánování svařoven ŠKODA AUTO a.s. [přednáška]. Praha: CIIRC, 31. 10. 2018.
- P9. HYNEK, P. Maximalizace digitálních příležitostí ve výrobě ŠKODA AUTO a.s. [přednáška]. Mladá Boleslav: IDC Manufacturing Forum, 5. – 6. 11. 2018.
- P10. HYNEK, P. Digitale Gelegenheiten im Karosseriebau. [přednáška]. Hannover DE: Digitalisierung auf dem Hallenboden, 21. - 22. 2. 2019.
- P11. HYNEK, P. Plánování svařoven. [přednáška]. Mladá Boleslav: ŠAVŠ, 19. 3. 2019.
- P12. HYNEK, P. Karosseriebau Planung. [přednáška]. Zittau DE: HSZG, 26. 3. 2019.
- P13. HYNEK, P. Automatizace při výrobě karosérie. AVP – Automatizace výrobních procesů. [přednáška]. Praha: ČVUT, Fakulta strojní, Ústav strojírenské technologie, školní rok 2018/2019.
- P14. HYNEK, P. Projektování výrobních linek pomocí nástrojů digitální továrny. [přednáška]. Žďár nad Sázavou: Projekce robotických pracovišť a jejich efektivní testování, 15. 5. 2019.



11. Seznam použitých tabulek a obrázků

Tabulka 1 - Vysvětlení pojmů výrobních úseků	33
Tabulka 2 – Vysvětlení pojmů materiálového toku	34
Tabulka 3 - Počty a délky spojů u karosérie Škoda Rapid [23]	36
Tabulka 4 – Tabulka pro přepočet vybrané spojovací technologie na 1 spojovací ekvivalent	53
Tabulka 5 - Spojovací ekvivalenty na karosérii Škoda Rapid	53
Tabulka 6 - Faktor svařovací technologie na možnost automatizace	56
Tabulka 7 - Definice veličin pro výpočet doby návratnosti	57
Tabulka 8 - Definice veličiny „pracovník“	58
Tabulka 9 - Prvky kinematického řetězce	67
Tabulka 10 - Souřadné systémy definované na zařízení	69
Tabulka 11 – Příklad matice dostupnosti svařovacích kleští	70
Tabulka 12 - Svařovací elementy "přední podlahy" Škoda Rapid	77
Tabulka 13 - Výsledek simulace	79
Tabulka 14 - Varianta 1 - základní proměnné	81
Tabulka 15 - Varianta 1 - výchozí matice	83
Tabulka 16 - Varianta 1 – proměnné ve výchozí matici	83
Tabulka 17 - Varianta 1 - výsledná matice	87
Tabulka 18 - Varianta 2 - rozšíření proměnných	88
Tabulka 19 - Varianta 2 - výchozí matice pro parametr α	89
Tabulka 20 - Výchozí stav parametru α pro jednotlivé hodnoty od 0 do 1... ..	90
Tabulka 21 - Varianta 2 - výsledná matice pro parametr $\alpha=0$	93
Tabulka 22 - Varianta 2 - výsledky pro všechny parametry α	94
Obrázek 1 - Štíhlá výroba	13
Obrázek 2 - Ostatní podnikové oblasti	14
Obrázek 3 - Výrobní systém v automobilovém průmyslu	18
Obrázek 4 - Proces GA [17]	24
Obrázek 5 - Stavba chromozomu	25
Obrázek 6 – Princip „Ruleta“	26



Obrázek 7 – Schématické znázornění struktury svařovny [22]	31
Obrázek 8 – Schéma výrobního řetězce	32
Obrázek 9 - Výrobní úseky ve svařovně Škoda Rapid	33
Obrázek 10 - Použití oceli na karosérii Škoda Rapid [23]	35
Obrázek 11 - Smíšená karosérie Range Rover [25]	35
Obrázek 12 - Spojovací technologie při výrobě karosérie	36
Obrázek 13 - Schéma odporového bodového svařování [26]	37
Obrázek 14 - Typy svařovacích odporových kleští, C vlevo, X vpravo [28]	40
Obrázek 15 - Schéma vysokofrekvenčního invertoru [28]	42
Obrázek 16 - Technologie obloukového svařování [26]	43
Obrázek 17 - Metoda CMT [31]	43
Obrázek 18 - Přivařování svorníků [33].....	45
Obrázek 19 - Svařování laserem [34]	46
Obrázek 20 - Lepený spoj [35]	47
Obrázek 21 - Horizontální lemovací lis [36]	48
Obrázek 22 - Rolnové lemování [37]	49
Obrázek 23 - Etapy procesu plánování	49
Obrázek 24 - Plán vzniku výrobku	52
Obrázek 25 – Schéma hloubky výroby karosérie Škoda Rapid	54
Obrázek 26 – Přehled části kusovníku karosérie Škoda Rapid.....	59
Obrázek 27 - 3D model postranice Škoda Rapid přiřazený k pozici v kus ..	60
Obrázek 28 - Spojovací elementy pro vnější postranici Škoda Rapid	60
Obrázek 29 - Přípravek pro svařování vnější postranice Škoda Rapid	61
Obrázek 30 - 3D layout linky přední podlahy karosérie Škoda Rapid	62
Obrázek 31 - Operační struktura Škoda Rapid	62
Obrázek 32 - Operace složená z parametrizovaných operačních kroků	63
Obrázek 33 - Schéma plánování v DF	64
Obrázek 34 – Příklad Ganttova diagramu	65
Obrázek 35 – Příklad Pertova diagramu	65
Obrázek 36 - Postup kinematizace a definice výrobního náradí [38]	66
Obrázek 37 - Kinematika svařovacích kleští typu X	68
Obrázek 38 – Obrázek z analýzy dostupnosti kleští.....	70



Obrázek 39 - Simulace dostupnosti se zohledněním robota	71
Obrázek 40 - Simulace robotické buňky	72
Obrázek 41 - Zapojení zařízení pro virtuální zprovoznění pomocí simulátoru PLC [39]	73
Obrázek 42 – Schéma propojení reálného řízení zařízení s virtuálním a reálným zařízením.....	74
Obrázek 43 - Časová úspora s využitím virtuálního zprovoznění	75
Obrázek 44 – Kusovník „přední podlahy“ Škoda Rapid	76
Obrázek 45 – Model svařence „přední podlahy“ Škoda Rapid	77
Obrázek 46 - Knihovna svařovacích kleští	78
Obrázek 47 – Vizualizace optimalizační úlohy	80
Obrázek 48 - Výchozí nastavení Solveru	85
Obrázek 49 – Změna parametru doby optimalizace na 180s.....	86
Obrázek 50 – Potvrzení převzetí výsledku	87
Obrázek 51 – Výchozí nastavení parametrů	91
Obrázek 52 – Změna parametru doby optimalizace na 300s.....	92
Obrázek 53 – Potvrzení převzetí výsledku	93
Obrázek 54 - Vazby mezi produktem a operací	96
Obrázek 55 - Vazby mezi operací a výrobní technologií	97